

3GeV 及び 50GeV シンクロトロン概要

1. はじめに

3GeV シンクロトロンはリニアックによって 400MeV まで加速された H-ビームを荷電変換した後、3GeV まで追加速する。加速されたビームはシンクロトロンから取り出し、中性子散乱実験、ミューオン実験等の 3GeV ビームユーザに供給するとともに、さらに加速するため 50GeV シンクロトロンに引き渡される。3GeV シンクロトロンの出射ビームパワーは 1MW で、このうち 97%を 3GeV ビームユーザへ、残り 3%を 50GeV シンクロトロンに送る。

図 1 に 3GeV シンクロトロン、50GeV シンクロトロンと実験施設の配置を示す。また図 2 には現在設計中の 3GeV シンクロトロン、50GeV シンクロトロンがエネルギー、電流値の観点から世界中でどのような位置にあるかを示す。

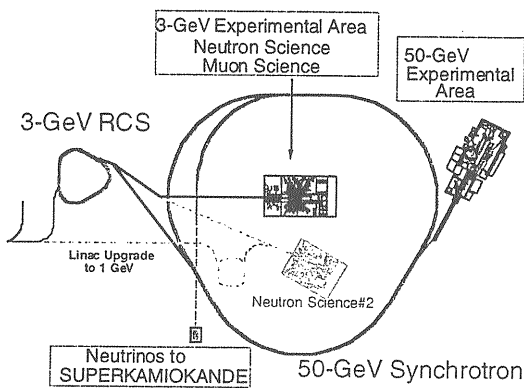


図 1.1 3GeV, 50GeV シンクロトロンならびに実験施設の配置

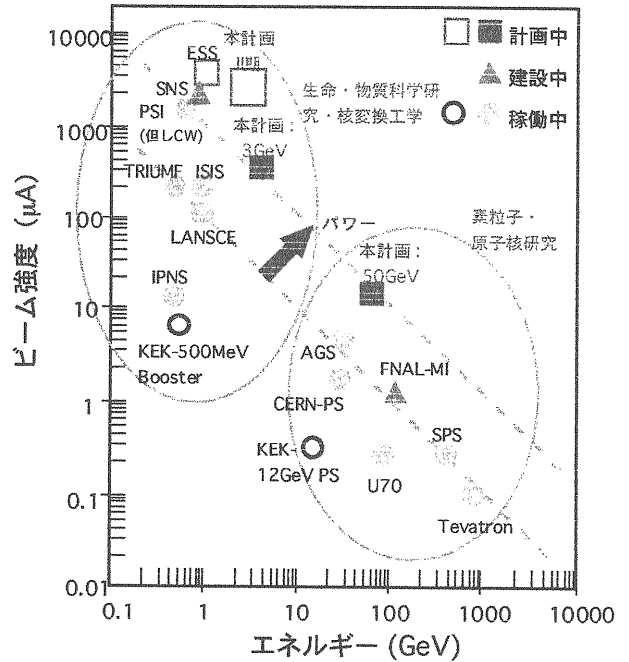


図 1.2 3GeV、50GeV シンクロトロンのビームパワーとその他の加速器との比較（建設中、計画含む）

2. 3GeV シンクロトロン

2.1 3GeV シンクロトロンの概要

3GeV シンクロトロンの概略図と主要なパラメータを図 2.1、表 2.1 に示す。リングの周長は 313.5m で形状は三角形に近い形をしている。3カ所の長直線部は入射+コリメーションセクション、出射セクション、加速セクションとなっている。3GeV の大きな特徴は繰り返しが速いことである。繰り返しは 25Hz, すなわち 1 秒間に 25 回入射、加速および出射を繰り返す。このような早い繰り返しの電磁石（偏向電磁石、四極電磁石など）は共振電源によって励磁される。図 2.2 に偏向電磁石の励磁パターンと入射、加速および出射の関係を示す。入射フェーズでは 400MeV までライナックで加速された H-ビームをおよそ 500 μ s 間、500 パルス分入射する。この際リング内に配置したバンプ電磁石と入射ビームラインに配置した垂直方向バンプ電磁石を利用してペインティングを行う。加速フェーズではリング内に設置した高周波加速空洞で 3GeV まで加速する。出射フェーズではリング内に配置したキッカー電磁石とセプタム電磁石で一気にリング内のビームを取り出す。この取り出されたビームのパワーは 25Hz 運転で 1MW となる。このような大出力を実現するためには、想定されるビーム不安定性の回避ならびに各フェーズでの制御不能なビームロスを実減することが重要となる。そのため 3GeV シンクロトロンでは先に述べたように入射時にペインティングという操作によって横方向エミッタンスを大きくしている。また、同時に高調波の利用によって縦方向エミッタンスの制御を行っている。いずれも空間電荷力を緩和し、ビームブローアップによるビームロスを実減することを目的としている。そのほか電磁石の設置精度、磁場精度の向上やビームを取り巻く環境（真空ダクト、キッカー電磁石、等）にも注意を払い、種々

のビーム不安定性を引き起こす要因の緩和を目指している。しかしながらビームブローアップによるロスをなくすことは容易ではない。むしろ不可能である。一方で Hands-on メンテナンスを行うためには、制御不能なビームロスを 1W/m 以下に押さえることが要求されている。これを実現するためコリメータシステムによるビームロスの局所化が重要となる。ラティスの設計においては、これらの重要課題を考慮して設計を行った。

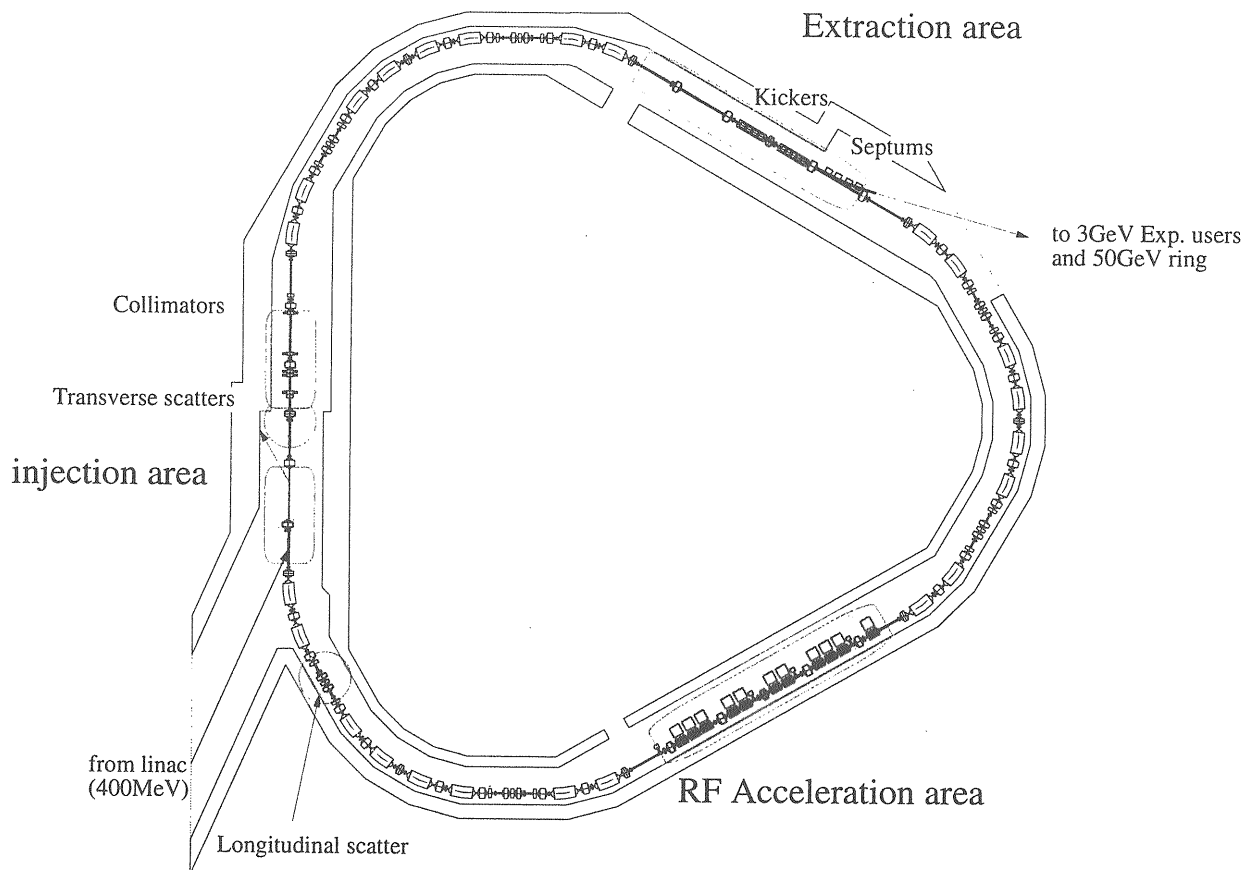


図 2.1 3GeV シンクロトロン の概略図

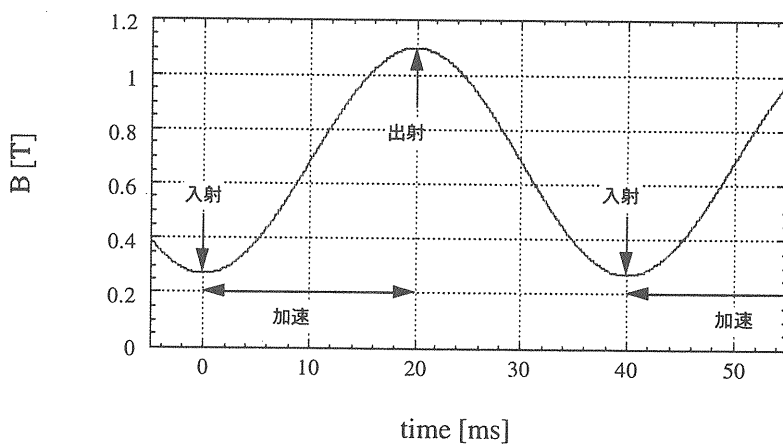


図 2.2 3GeV シンクロトロン の加速サイクル

表 2.1 3GeV シンクロトロン の主要パラメータ

Quantity	Value
Circumference	313.5 m
Average radius	49.9m
Injection energy	400 MeV
Extraction energy	3 GeV
Repetition rate	25 Hz
Beam power	1.0 MW
Number of protons	8.322×10^{13}
Physical Aperture	>324 p. mm. mrad
Collimation Aperture	216 p. mm. mrad
Momentum Acceptance	$\pm 1 \%$
Tune(Horizontal/Vertical)	7.35/5.8
Transition Gamma	9.05
Natural Chromaticity(Horizontal/Vertical)	-8.95/-8.54
Super-periods	3

2.2 3GeV シンクロトロンラティス

2.2.1 リファレンスラティス

3GeV シンクロトロンでは以下の点に重点を置き設計を行った。

- (1) 50GeV シンクロトロンとのマッチングのため High transition gamma
- (2) 入射、コリメータ、加速に有利な Dispersion free straight
- (3) 入射+コリメータ、加速、出射の機器を独立した直線部に配置する

ここで(1)は 50GeV シンクロトロンに入射した際の空間電荷力緩和のためである。(2)はディスパージョンフリーの領域ではビームサイズが運動量分散によらないため、効率よく入射、横方向コリメーションが行えるためである。またシンクローベータ振動のカップリングも気にしなくて良い。(3)はメンテナンスの面から、RF セクションを独立させたいという要求と入射によって発生した瞬間的なビームハローを入射部直後に処理する目的から入射+コリメータセクション、出射セクション、RF セクションに分割している。これよりリングが図 2.1 に示すような3回対称な形状となっている。

以上の条件の下、数種類のラティスを比較検討した結果、以下の優位性を考慮して FODO ベースのラティスを選定した。

- (1) 四極電磁石の磁場勾配が比較的小さい
- (2) ラティス関数の変化が緩やか
- (3) セルあたりの位相進みが大きく、コリメータ配置の自由度が高い

図 2.3 スーパーペリオドのラティス、図 2.4 に β 、 η 関数の変化を示す。図 2.3 から分かるようにスーパーペリオドは大きくアーク部と直線部に分けられる。アーク部では Missing Bend 部を設けることに

よって

- (1) ハイトランジションガンマ (~9)
- (2) 縦方向コリメーションシステムの配置
- (3) 効果的なクロマティシティ補正

を実現している。また、直線部は Dispersion Free とすることで

- (1) 横方向コリメーションの高効率
- (2) 入射 (ペインティング)
- (3) ベーターシンクロカップシンクロトロンの抑制

を実現した。

現在のラティスの問題点として以下に示すものがあげられる。

- (1) Family 数が非常に多い
- (2) ベータ関数のモジュレーションが大きい
- (3) ベンディング部のアパーチャが厳しい
- (4) 進行方向スペース確保のため 4 極電磁石の磁極長がまちまち

これらのうち(1)~(3)はアパーチャの制限から、(4)は周長の制限から 4 極磁石ポールチップでの磁束密度で規格化して弱い 4 極電磁石の磁極長を短くしたために生じている問題である。

図 2.5 はチューンダイアグラム上でのチューン動作点を示したものである。共鳴線は 4 次までの構造共鳴を表示している。ベアチューンは (7.35, 5.8) を想定している。ベアチューンの設定では 2 次までの構造共鳴からの距離、ペインティング過程での x y カップシンクロトロンの抑制を考慮している。

表 2.2 は入射ビームエミッタンス、ペインティングエミッタンス、コリメーションアパーチャ、フィジカルアパーチャ等をまとめたものである。入射ビームはビーム輸送系のコリメーションシステムによっ

て $\varepsilon < 4\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\Delta p/p < \pm 0.1\%$ にカットした上でシンクロトロンに入射する。シンクロトロン内ではそのビームを荷電変換し、 $144\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ までペインティングによって広げ、空間電荷効果を緩和させる。空間電荷効果によってブローアップしたビームは $216\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ で設定したコリメータシステムによってコリメーションすることによりビームロス(注)の局所化をはかる。フィジカルアパーチャはコリメーションアパーチャ $216\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ に対して $324\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以上を確保している。またダイナミックアパーチャは $648\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以上である。一方、運動量広がり(注)のアクセプタンスはチョッピングファクタ 54% 、 $324\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビームに対して $\pm 1.0\%$ である。

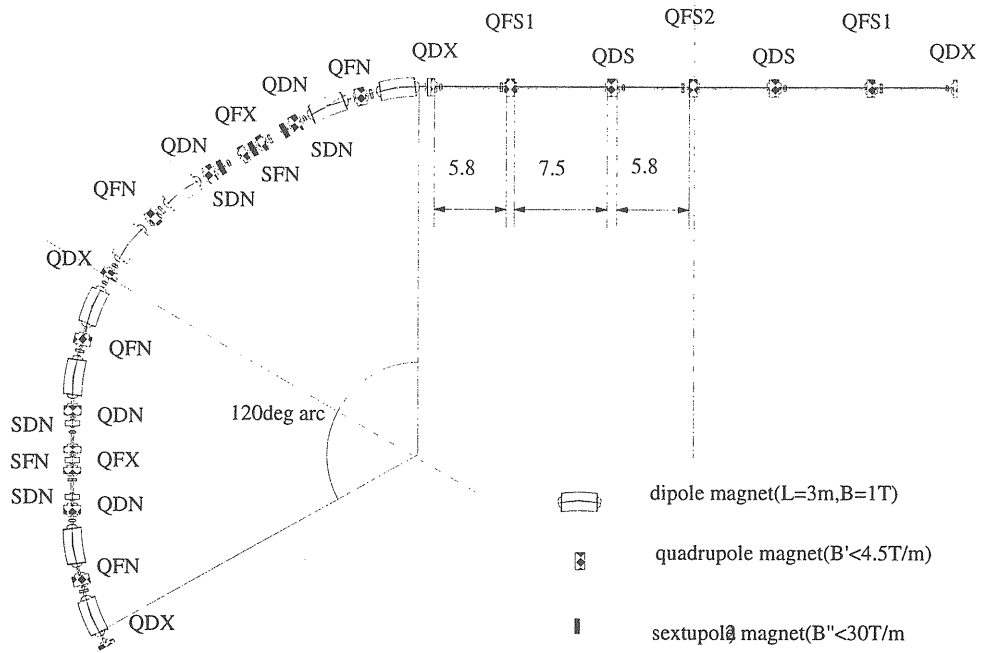


図 2.3 1 スーパーペリオドの電磁石配置図

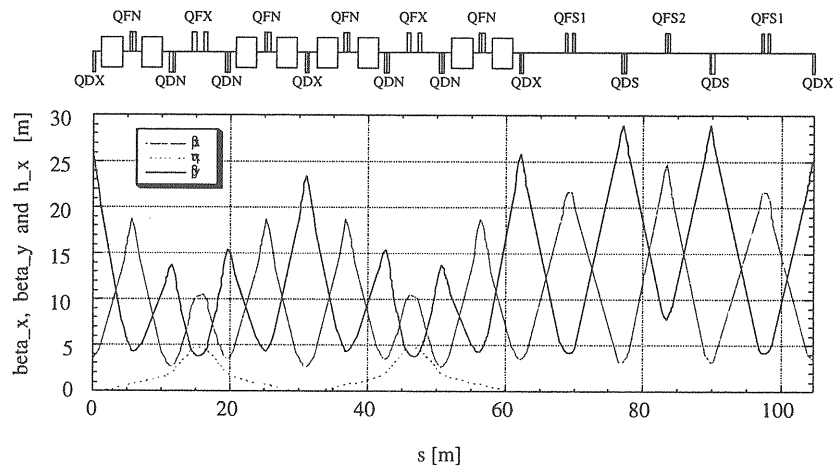


図 2.4 1 スーパーペリオドの β 、 η 関数

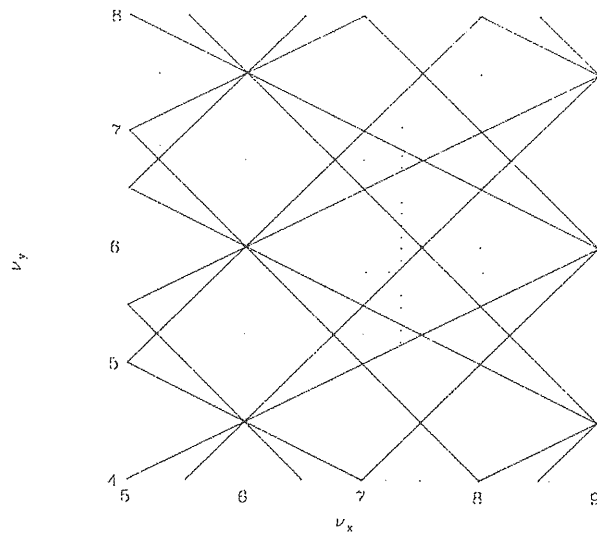


図 2.5 チューンダイアグラムと動作点

表 2.2 3GeV シンクロトロンのアパーチャ、ビームエミッタンス

Quantity	Value
Emittance of injection beam	4π . mm. mrad
Emittance of painting	144π . mm. mrad
Aperture of collimator	216π . mm. mrad
Physical Aperture of ring	324π . mm. mrad
Dynamic Aperture of ring (correction)	$>648\pi$. mm. mrad

2.2.2 チューナビリティ

既存ビームパワーを越える様な大強度加速器の場合、予期しないビーム不安定性によるビームロス増大の危険性がある。これにより目標の 1MW 出力を達成できないような事態も想定される。そのためビーム不安定性を回避するためのチューン可変範囲の確保は重要である。3GeV シンクロトロンで FODO ベースのラティスで構成しているのには、チューンダイアグラム上で他のラティス（ダブルット、トリプレットなど）と比較して広い安定領域を有するという理由もある。図 2.6 に現在想定しているチューンビリティを示す。図中ハッチング部分がおおよそチューン可変範囲である。図 2.7~2.8 に空間電荷効果を取り入れた SIMPSONS の計算で得られた結果を示す。

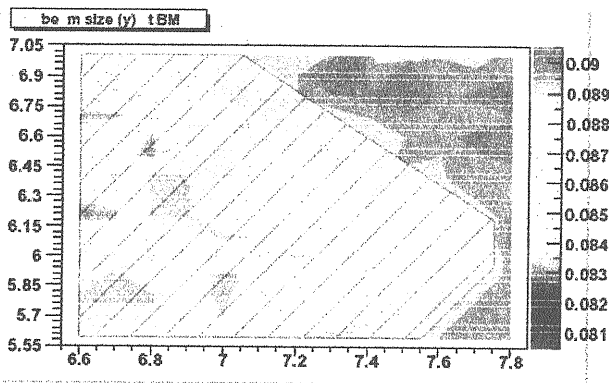


図 2.6 チューン可変範囲

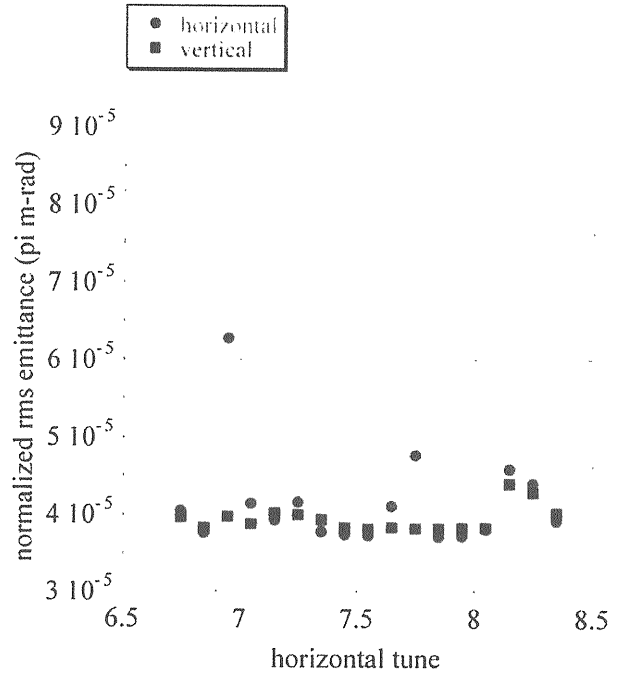


図 2.7 ビームブローアップの ν_x 依存性
($\nu_y=5.8$ に固定)

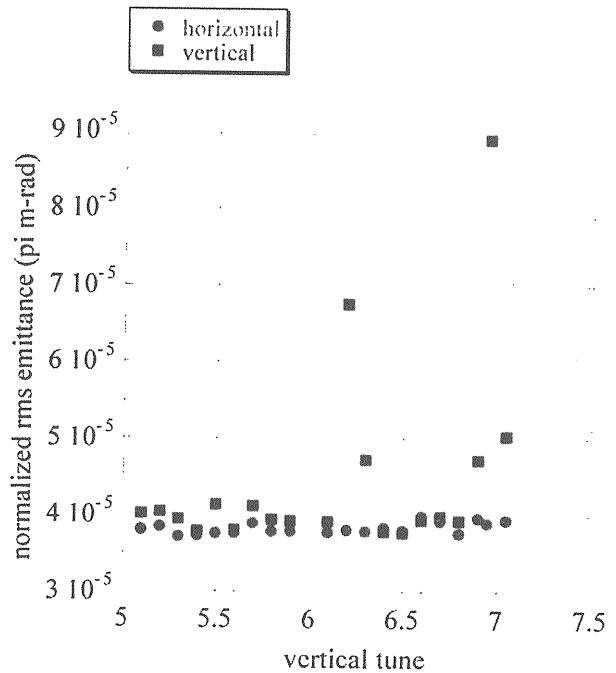


図 2.8 ビームブローアップの ν_y 依存性
($\nu_x=7.35$ に固定)

2.2.3 COD、COD 補正

電磁石の誤差磁場、アライメントエラーによって COD (closed orbit distortion) が発生する。COD は実質的にビームサイズを大きくすることに他ならないため、この COD をできる限り小さくする必要がある。現在 3GeV シンクロトロン内には各 4 極電磁石に対応させて 54 台の COD 補正用電磁石とビームポジションモニタが配置されている。この節では各種誤差磁場を想定し、発生しうる COD の計算結果を示す。

COD の要因として、個々の偏向電磁石および四重極電磁石の磁場強度誤差と設置誤差の大きさは表**に示す値を仮定している (全てガウシアン分布の標準偏差) :

表 2.3 設定誤差

誤差要因	設定誤差
磁場強度誤差	5×10^{-4}
設置誤差	0.25 mm
回転方向誤差	0.5 mrad

上記の数値を用いて 500 ケースの計算を行った場合、最大値は水平・垂直方向の COD の全周にわたる最大値は水平方向 5mm、垂直方向 10mm 程度となる。ただしエラーの 2σ 以上はカットしてある。図 2.9 はシンクロトロン1周にわたる COD の変化の1例を示したものである。図 2.10 は COD を発生させる要素のうち、どの要素が大きいかを調べたものである。左上部の図はすべてのエラーを入れた場合の COD を表し、右上、左下、右下の順に磁場強度誤差、設置誤差、回転方向誤差の COD への寄与を表す。これから設置誤差の影響が大きいことがわかる。先にも述べたように COD をそのまま残しておくとおパーチャが無駄になるとともに局所的なロスの原因にもなりうる。そのため補正が必要になる。精度良く補正

行うにはモニタの精度も重要な要因である。補正すべき対象が精度良く測定できないとそれを改善することなど到底無理な話である。モニタの位置測定精度 (分解能) を 0.1mm とした場合、54 台の補正電磁石を駆使して補正を行った後の COD の最大値は水平方向、垂直方向ともに 0.5mm 程度に抑えられる。ちなみに位置測定精度を 0.2mm とした場合、補正後 COD はおよそ 0.7mm となる。図 2.11 はシンクロトロン1周にわたる補正後の COD の変化の1例を示したものである。図 2.12 は補正後の COD 分布 (上段) と補正用電磁石の強度分布 (下段) を示したものである。補正用電磁石としては有効磁場長 10 cm で最大 400 ガウスの磁場強度が必要とされる。

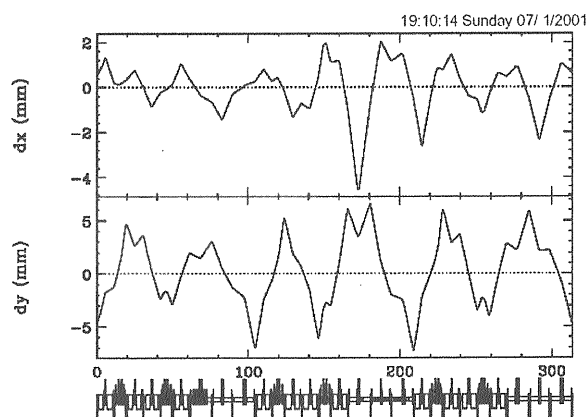


図 2.9 リング1周の補正前 COD

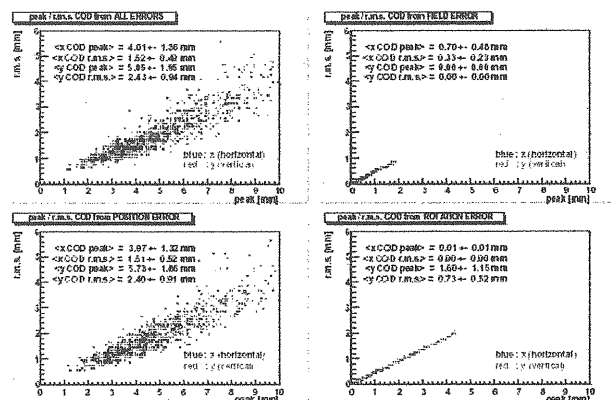


図 2.10 補正前の COD 分布

左上: すべてのエラーによる COD

右上: 磁場強度誤差による COD

左下: 設置誤差による COD

右下: 回転方向誤差による COD

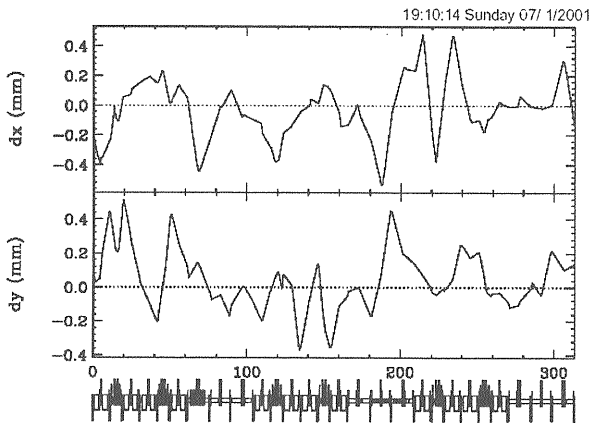


図 2.11 リング 1 周の補正後 COD

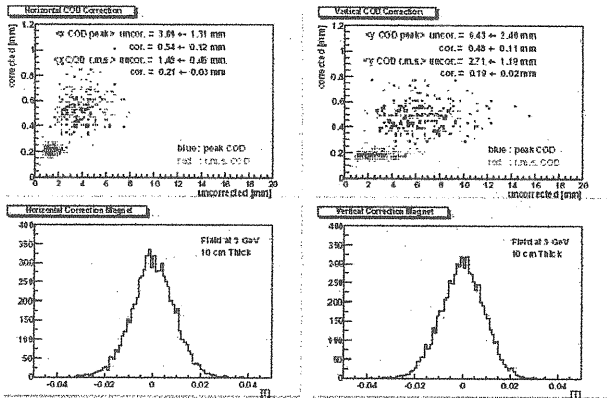


図 2.12 補正後の COD 分布と補正電磁石強度分布

左上: 水平方向の補正後 COD

右上: 垂直方向の補正後 COD

左下: 水平方向の補正用電磁石の強度分布

右下: 垂直方向の補正用電磁石の強度分布

2.2.4 クロマティシティ補正

クロマチシティとは光学分野では色収差と呼ばれるもので、運動量の違いによって4極電磁石による収束・発散力が異なることを言う。すなわちクロマチシティによって運動量の違いのある各粒子はそれぞれ異なったベータatron振動を行うことになる。従ってクロマチシティが大きい場合には共鳴線にひっかかりビームロスを引き起こす要因にもなりうる。また β 関数・分散関数等にも変動が生じるため注意が必要である。

図 2.13 中、破線は補正前のチューンの運動量依存性を示す。運動量の違いによってチューンの値が異なっていることがわかる。ここで

$$\text{chromaticity} = \frac{\partial \nu}{\partial \left(\frac{\Delta p}{p} \right)}$$

より 3GeV シンクロトロンクロマチシティは水平、垂直ともにおよそ-10 程度となる。このチューンの運動量依存性を補正することをクロマチシティ補正と呼ぶ。クロマチシティ補正はクロマチシティは6極電磁石を用いて行うことが可能である。運動量によるチューンシフトは運動量によるチューンシフト

$$\Delta \nu = \left(-\frac{1}{4\pi} \int_0^c k(s) \beta(s) ds \right) \frac{\Delta p}{p}$$

と表され、6極電磁石によるチューンシフト補正量は

$$\Delta \nu = \left(\frac{1}{4\pi} \int_0^c \frac{B''(s) \beta(s) \eta(s)}{B\rho} ds \right) \frac{\Delta p}{p}$$

と表される。

図 2.13 中実線が補正後のチューンの運動量依存性を表している。これを見る限りでは6極電磁石によるクロマチシティ補正は完全に行えているように見えるが、実はそうではない。式からわかるようにリング全周(完全対称であれば1スパーペリオド)での積分値で補正しているにすぎない。すなわち局

所的なチューンの変化 (phase advance) は補正できているかどうかは疑わしいものである。図 2.14 に運動量の違いによる QFS2 (長直線部中心の収束用 4 極電磁石) での β 関数の変動を示したものである。このように局所的にみればチューンの変動は完全に補正できていないことがわかる。6 極電磁石をできるだけ分散して配置することでこの局所的な変動を小さくする事が可能となる。図 2.15 は補正なし、2 ファミリでの補正あり、4 ファミリでの補正ありの 3 ケースで β の運動量依存性をみたものである。これから分かるように 4 ファミリの場合、ベータ関数の変動の運動量依存性もかなり改善できていることが分かる。

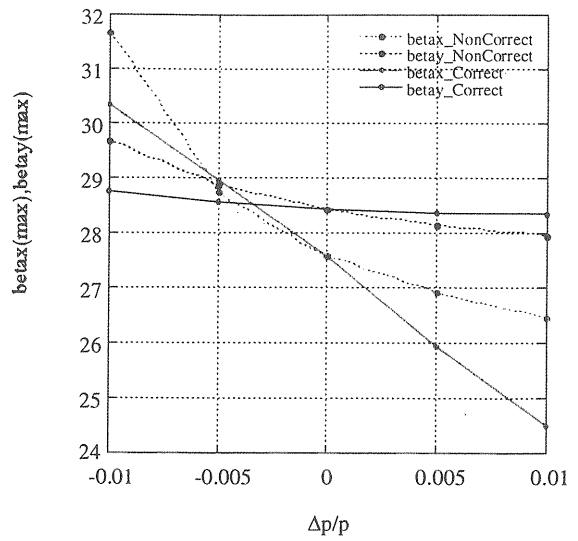


図 2.14 β 関数モジュレーションの運動量依存性
破線：補正前、実線：補正後

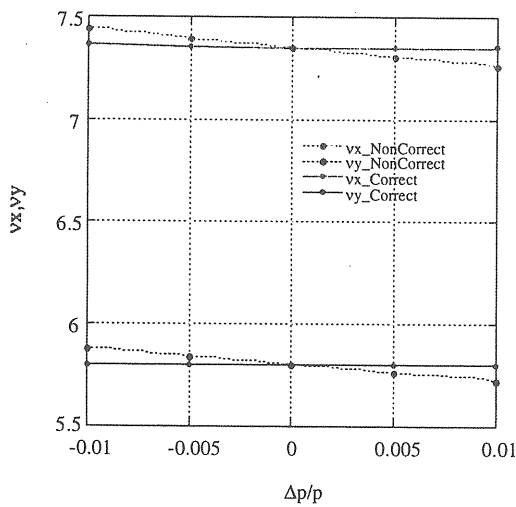


図 2.13 チューンの運動量依存性
破線：補正前、実線：補正後

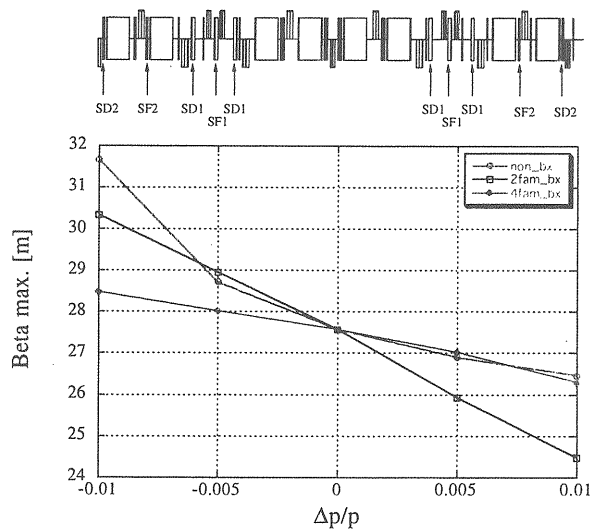


図 2.15 β 関数モジュレーションの運動量依存性
(6 極電磁石のファミリー数を変えた場合)

2.3 入射セクション

2.3.1 概要

シンクロトロンではペインティングと呼ぶ操作によって、リニアックからくるビームを重ね合わせてリング内でのエミッタンスを広げる。これによって空間電荷効果によるビームのブローアップを許容値以下に抑えることが可能となる。おおよその傾向を知る上では次式に示すラスレットの式が有効である。

$$\Delta v = -\frac{r_p n_t}{2\pi\beta^2\gamma^3\epsilon B_f}$$

これよりチューンシフトとバンチングファクタの関係ならびにエミッタンスの関係が図 2.16、図 2.17 のように求められる。バンチングファクタについては縦方向のシミュレーションの結果から 0.3 程度は実現可能である。従ってチューンシフトを-0.3 まで許した場合、ペインティングエミッタンスとして $144\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ まで広げればよいことになる。

図 2.18 に典型的な加速パターンでのビームエネルギー、バンチングファクタの時間変化を示す。これよりエミッタンスを $144\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、バンチングファクタを 3.15 とした場合、加速に従ってチューンシフトがどのように変化するかを図 2.19 に見ることができる。

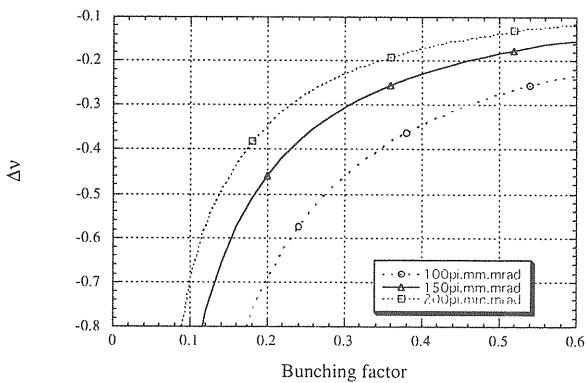


図 2.16 チューンシフトのバンチングファクタ依存性

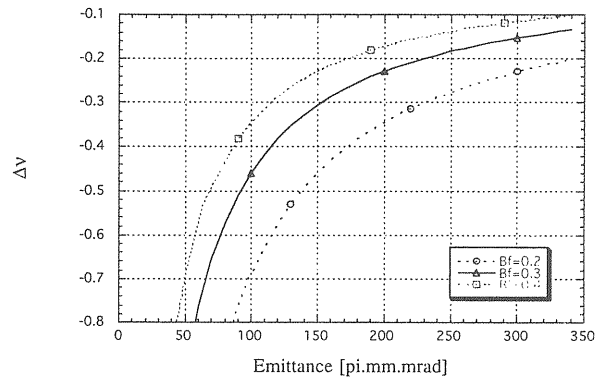


図 2.17 チューンシフトのエミッタンス依存性

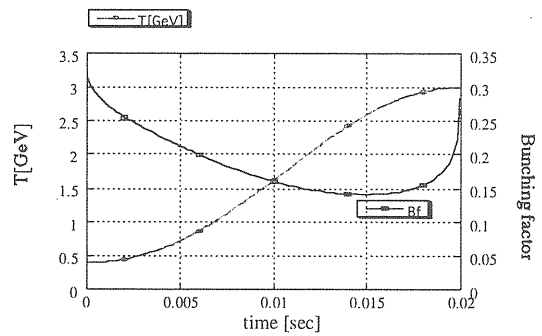


図 2.18 ビームエネルギー、バンチングファクタの時間変化

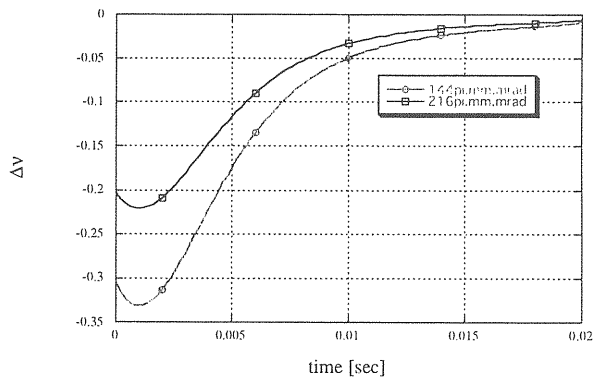


図 2.19 チューンシフトの時間変化

2.3.2 入射ビーム条件

表 2.4 にリニアックの出射ビームパラメータを示す。入射されるビームはリニアックから 3GeV シンクロトロンまでのビーム輸送系 (L3BT ライン) に設置された縦方向コリメータ、横方向コリメータによってハロー部分を削り、入射に適したビームに整形された後、シンクロトロンに入射する。これらはすべてシンクロトロン内 (入射部近傍の入射ラインも含めて) でのロスを低減するためである。

横方向エミッタンスに関しては 4π .mm.mrad 以上のビームを L3BT ラインの横方向コリメータで削る。このコリメータのおかれる場所はディスパージョンフリー ($\eta = \eta'$) ラティスとしてある。縦方向エミッタンスについても同様に $\pm 0.1\%$ 以上のものはビーム輸送系で削るが、その性質上 0.15% のものまで存在しうることになる。詳細はコリメータの講義を参照されたい。

3GeV シンクロトロンで受け入れられる横方向エミッタンスを 4π .mm.mrad (100% : コリメーション済み) と設定した理由は以下の通りである。

- (1) ペインティング効率の向上
- (2) フォイル通過粒子数 (総数) の低減
- (3) 入射部近傍のラインの放射化低減

(1) ペインティング効率の向上に関しては、ペインティングが計算通りうまくいき、ペインティング中の空間電荷によるビームブローアップがほぼ完全に押さえられたとして、チューンシフトは 2π .mm.mrad と 6π .mm.mrad では 6π .mm.mrad の方が 20% 程度大きくなる。さらに詳しい空間電荷力による過渡的なビームブローアップについては現在 SIMPSON, ACCSIM で詳細計算中である。(2) フォイル通過粒子数 (総数) の低減に関しては、フォイル通過粒子数はビームサイズが 10% 増加すれば 20%

程度増加する。また個々の粒子についてもフォイルを通過する回数が 10%-20% 増える。これらはビーム散乱によるエミッタンス増加、フォイル寿命の低下を招くことになる。(3) 入射部近傍のラインの放射化低減も重要である。現在、入射部近傍のビームラインの設計は 1.5 倍のブローアップを見込み 6π .mm.mrad で行っている。入射部近傍は非常に複雑な構造をしており、アパーチャ的に非常に厳しい。これは周回ビームサイズが非常に大きいため、入射ラインと周回ビームのセパレーションが既存の加速器ほどとれないためである。

また電流値、入射時間 (パルス幅) に関しては 3GeV シンクロトロンのコミッショニング時にはビームカレントを落とす必要があることから、表 2.5 に示すような運転モードを要求している。

ビームカレントを落とす手法としては以下の 3 方法が考えられる

- (1) 入射パルス数を減らす
- (2) ピーク電流値を下げる
- (3) チョッピングファクタを上げる

まずシンクロトロンの基本調整時 (周回周波数測定、軌道調整、チューン測定など) には (1) の入射パルス数を減らすことで対応できる。しかし、ペインティング調整時にはある程度のパルス数が必要となるため、ロス低減のためピーク電流値を下げる必要がある。チョッピングファクタに関しては数分の 1 程度の可変量しかないため微調整としてしか利用できないと思われる。

また図 2.20、2.21 に入射ビームのパルス構造を示す。図 2.20 はマクロパルス構造を示し、25Hz で繰り返されるパルスである。この中に図 2.21 に示す 396ns の中間パルスが約 680 個含まれる。

表 2.4 Linac の出射ビームパラメータ

transverse	emittance
rms	0.3~0.4 π . mm. mrad
90%	1.3~1.7
99%	3~5
99.9%	5~10
longitudinal	$\Delta p/p$
99.9%	+/-0.1%

表 2.5 Linac のビーム調整範囲

電流値[A]	パルス数	繰り返し[Hz]
0.0001	2 (1)	1 ショット
0.001	10	1
0.01	100	25
0.05	338	
	676	

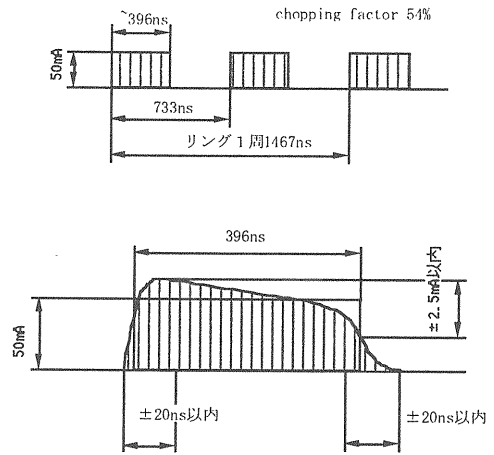


図 2.21 入射ビームの中間バンチ構造

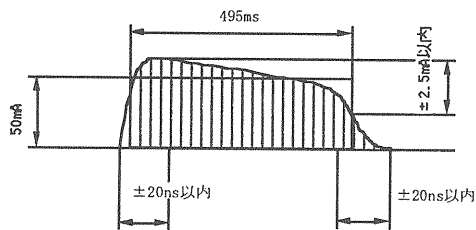


図 2.20 入射ビームのマクロバンチ構造

2.3.3 H⁻ビーム入射

2.3.3.1 概要

ビーム入射の方法にはいくつかの種類がある。陽子に限って話を進めると、H⁺入射、H⁻入射の違い、また1ターン入射、多重入射の違い、バケットーバケット入射、断熱捕獲 (adiabatic capture) 入射の違いなどである。3GeV シンクロトロンではH⁻入射によるバケットーバケット多重入射を採用している。H⁻入射の場合、H⁺入射と異なり位相空間においてリュウビルの定理に反することなくビームを多重回重ね合わせることができる。従って位相空間での粒子分布を制御可能となる。一方、空間電荷効果によるビーム発散は粒子分布に依存することから、H⁻入射を行うことで空間電荷効果を制御する手段を得ることになる。

一方でH⁻入射には注意しなければならない点が多くある。それらについて以下で説明する。

2.3.3.2 ローレンツストリッピング

H⁻イオン電子束縛エネルギーは0.775eVと非常に小さいため磁場中で曲げられるとH⁰イオンに変換されてしまう。H⁰に変換されたビームは設計軌道からずれビームロスとなるため、ビーム輸送系、入射系で使用できる磁場強度は制限される。図2.22に磁束密度B[T]に対するビームロス量の関係を示す。ここではローレンツストリッピングによるビームロスを1W/m以下となるように磁束密度の上限を設定した。入射ビームのパワーは133kWであるから1mあたり許容できるロスの割合は7.52E-06となる。安全をみて許容ロスの割合を1.0E-06とした場合、磁石長1mの偏向電磁石の場合で磁束密度の上限は0.55T程度となる。4極電磁石については、その磁場勾配をK1[T/m]としてビーム径r[m]の点での磁場

$B=K1*r$ の値が上記上限を越えないように設計する必要がある。

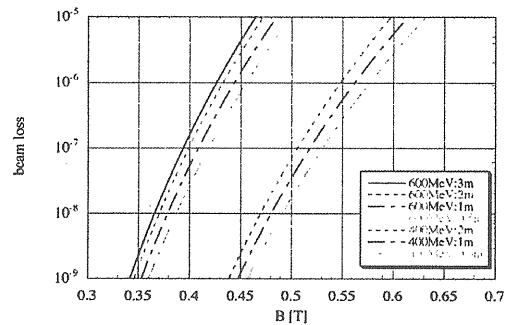


図 2.22 ローレンツストリッピングロス量の磁場依存性

2.3.3.3 荷電変換

図2.23、図2.24に入射ビームエネルギー400MeV、カーボンフォイルを使用した場合のフォイル厚に対する荷電変換効率を示す。図2.23はH⁻ビームからH⁻, H⁰, H⁺への荷電変換効率、図2.24はH⁰からH⁰, H⁺への荷電変換効率を示す。

現時点で想定している荷電変換フォイルの厚さは290 μg/cm²でH⁻からH⁺への変換効率は99.7%を見込んでいる。

この場合、H⁻として残るものは3.81×10⁻⁵%で、H⁰が0.3%発生する。入射時のビームパワーは133kWであるからH⁰のビームパワーは0.4kWとなる。

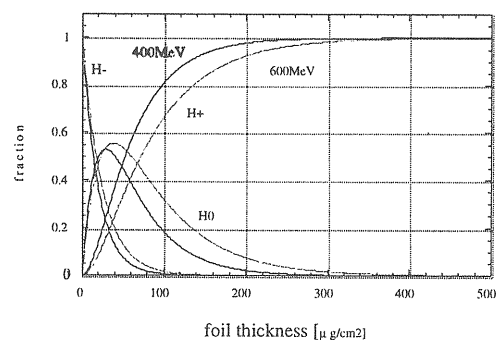


図 2.23 H⁻ビームの荷電変換効率

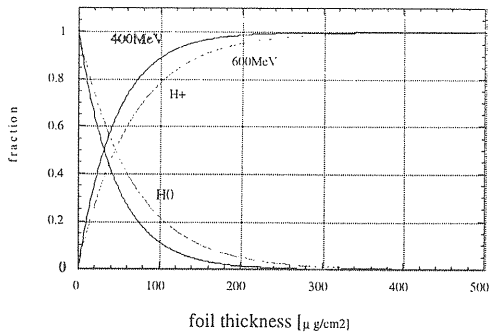


図 2.24 H⁰ ビームの荷電変換効率

2.3.3.4 励起 H⁰

先に述べた 0.4kW の H⁰ ビームは荷電変換フォイルを通過する際、励起状態にあげられる。しかもこの励起レベルは多岐にわたり、その励起レベルと雰囲気磁場によって異なった生存時間で H⁺ へ崩壊する。

これは磁場中で曲げられ始める位置にばらつきがあることを意味し、和束数十 cm、時間でいえば数十 ns のレベルで起こる瞬間的なエミッタングロスである。励起 H⁰ の崩壊によって生じるロスを制御することは 1MW 出力を達成する上で非常に重要となる。図 2.25 に 400MeV の H⁻ ビームがフォイルを通過する際に生成された励起 H⁰ ビームの雰囲気磁場に対する寿命をプロットしたものである。各励起レベルの寿命は大きく異なる。

$n \geq m$ の励起レベルにある H⁰ の存在比は次式で表される。

$$Loss\% = \frac{\sum_{n=m}^{\infty} \frac{1}{n^3}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3}}$$

これより、 $n \geq m$ の励起レベルにある H⁰ の存在比を求めると表 2.6 のようになる。

$n=6$ の状態にある励起 H⁰ をすべて制御不能のロスとすると H⁰ ビームの 0.39% が制御不能なロスとなる。

これはビームパワーで約 1.6W となる。

なお、 $n < 6$ の状態にある励起 H⁰ は H⁺ に崩壊することなく H⁰ ビームダンプへと導かれる。そのビームパワーは 0.4kW と想定される。また $n > 7$ の状態にある励起 H⁰ は瞬時に H⁺ へと変換されるためリングを

周回することになる。

表 2.6 $n \geq m$ の励起レベルにある H⁰ の存在比

励起レベル (m)	存在比
m=1 ($n \geq 1$)	1
m=2 ($n \geq 2$)	0.1681
m=3 ($n \geq 3$)	0.0641
m=4 ($n \geq 4$)	0.0333
m=5 ($n \geq 5$)	0.0203
m=6 ($n \geq 6$)	0.0136
m=7 ($n \geq 7$)	0.0097

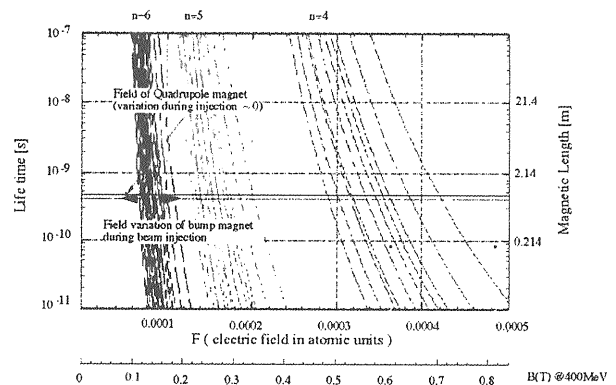


図 2.25 励起 H⁰ の磁場中での寿命

2.3.4 入射ラティス設計

図 2.26 に現在想定している入射ラティスを示す。先にも述べたように入射ラティスを設計する上で考慮すべき点が多い。まず①ではローレンツストリッピングによるロスを低減するため 0.5T の磁石を使用している。②、③ではカーボンフォイルを通過する事で発生した励起 H^0 ビームの崩壊によるビームロス低減のため磁場の設定に注意が必要である。また入射点を対象にバンプ 1、2 とバンプ 3、4 を配置することによってエッジ効果、漏れ磁場の影響などを低減できる。

この入射方法の欠点としてはバンプ軌道の中に 4 極電磁石が含まれることである。これによってシンクロトロンチューンを変えた場合、各バンプの励磁パターンならびに入射軌道の微調整を行う必要がある。これを解決するには挟まれた 4 極電磁石を固定にすればいいわけであるが、現在のアーチャーではチューナビリティを犠牲にするしかない。

その他の入射ラティスについて検討した結果を以下に示す。

(1) 4 極電磁石を挟んだ 8 台バンプシステム
固定バンプとペインティングバンプを分けることにより、励起 H^0 の分離の自由度が高い、 H^- と H^+ のマージが容易（入射セプタム部でのセパレーションが大きくとれる）といったメリットがある。しかし 4 極電磁石を挟むことによってチューン変更時の調整が複雑となる点は現在の入射ラティスと同様、デメリットである。

(2) 4 極電磁石を挟まない 8 台バンプシステム
4 極電磁石を挟まないでチューンを変えることが容易で、バンプ電磁石の励磁による COD も発生しにくいというメリットがある。しかしハーフセル内での機器配置が複雑となるうえ電源への負担も増える。

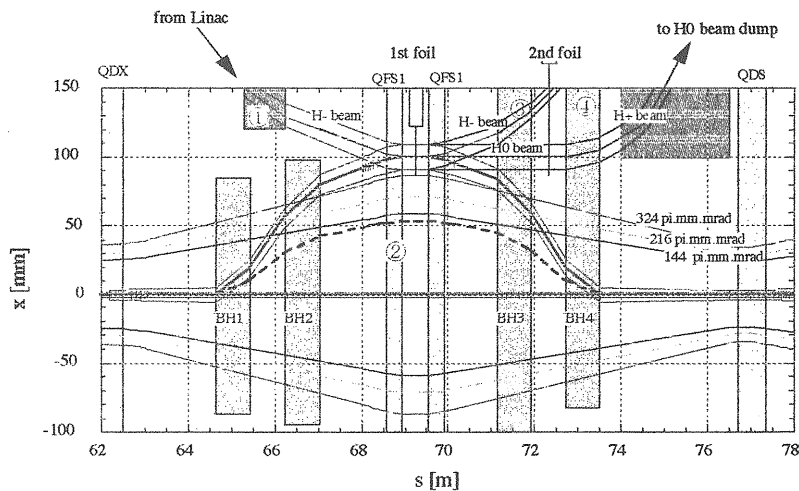


図 2.26 入射機器配置とビーム軌道

2.3.5 ペインティング

2.3.5.1 概要

シンクロトロンではペインティングと呼ぶ操作によって、リニアックからくるビームを 144p. mm. mrad まで広げる。これによって空間電荷効果によるビームのブローアップを許容値以下におさえることが可能となる。バンパ軌道はリング内に配置したバンパ電磁石によって水平方向バンパ軌道をつくり、入射ライン上に配置したバンパ電磁石によって垂直方向バンパ軌道をつくる。この垂直用バンパ電磁石は入射フォイルの位置を基点に位相進みで π 上流側に配置する。これによってフォイル位置で $y=0$ 固定のまま y' (軌道の傾き) を変えることができる。ペインティングはこれら 2 つのバンパ軌道の変位を変えて行う。また変位の時間依存性を変えるとによって位相空間での粒子密度分布を制御することができる。以下では 2 種類のペインティング方法について説明する。

2.3.5.2 anti-correlated painting

anti-correlated painting とは水平方向と垂直方向のペインティングの方向を逆にしたものである。具体的には水平方向にはアクセプタンスの中心から外側に、垂直方向では外側から内側に向かってペインティングを行う。図 2.27 に anti-correlated painting ペインティングを行った場合の位相空間と実空間の関係を示す。図に示すようにこの場合、実空間粒子分布は楕円形となる。位相空間における粒子密度分布はそれぞれのバンパ軌道の時間変化を調整することで変えることができる。位相空間において一様な分布とする場合、各バンパの関数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{水平方向} & 50\left(1-\sqrt{\frac{t}{T}}\right)+55;mm \\ \text{垂直方向} & 5\sqrt{1-\frac{t}{T}};mrad \end{aligned}$$

ここで t は入射開始からの時間、 T は入射周期である。また SIMPSONS を用いてペインティングのシミュレーションを行った結果を図 2.28、図 2.29 に示す。図 2.28 は空間電荷効果を入れない場合である。これに空間電荷効果を入れた場合が図 2.29 である。ここでは縦方向のトラッキングは行っておらず、入射ビームとして 2 倍高調波を入れた場合の粒子分布を与えている。

なお、計算結果についてはプレリミナリなもので現在詳細な計算ならびに ACCSIM との比較検討等を行っている。

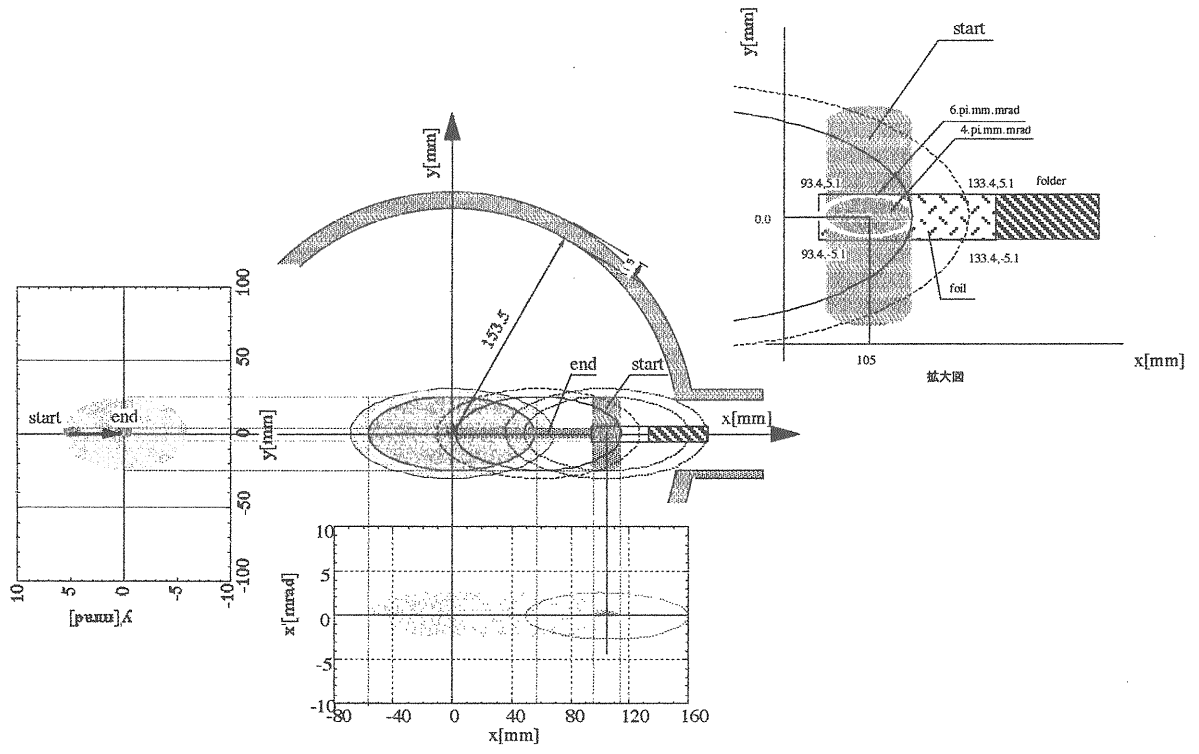
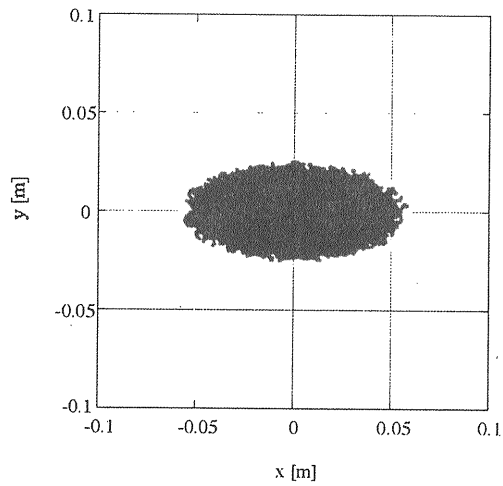


图 2.27 anti-correlated painting

anti-correlated paint - space-charge OFF



```

! define machine
!
brho, onecycle=0.020, istepb=2.e-6, constant=0.9542578
rf, harmonics=2, vfactor=1.e-6, constant=170.e-6
! lattice, apertun=0.090, lapertun=1.5, iifile=77, slow, iifile2=4
lattice, apertun=0.28, lapertun=1.5, iifile=77, slow, iifile2=4
!
! define beam
!
cleardistribution
macroparticle, numpart=10000, &
! distrib=lp arbol, distribu=kv, &
! dssg=0, dppsig=0.0, cxn=1.e-6, cym=1.e-6, &
! driftspace=0, sigmacu=3.0, xinjof=0, &
! injecm=339, paimtra, &
! iscediou=9246487, isacdlr=4857679
injecum=1, chopper1=0.22, chopper2=0.22, &
testparticle, numpart=6, &
! smin=0, smi=0, spmin=0.0, spunt=0, &
! xmin=1.e-12, xunt=9.15e-6, &
! ymin=1.e-12, yunt=9.15e-6
! testparticle, numpart=30, smin=0, smi=0, &
! spmin=2.0e-3, spunt=0.0e-3, xmin=450.00e-6, xunt=15.0e-6, &
! ymin=300.00e-6, yunt=10.0e-6
! spacecharge, current=5.0, gammaf=-1.596, emits=0.010, &
! spacecharge, current=0.0, nrg=40, nrg=50, nrbg=16, mmod=4
monitor, nprofile=50, wprofile=0.200
! track beam
!
run,
! nstep=0.1e-9, istepj=0.1e-9, &
! icon=fromzero, nitrans=400, nformatted, &
! dumpmacro=100000, dumpptes=1, dumpjprofil=100000, &
! dumpfil=100000
stop
    
```

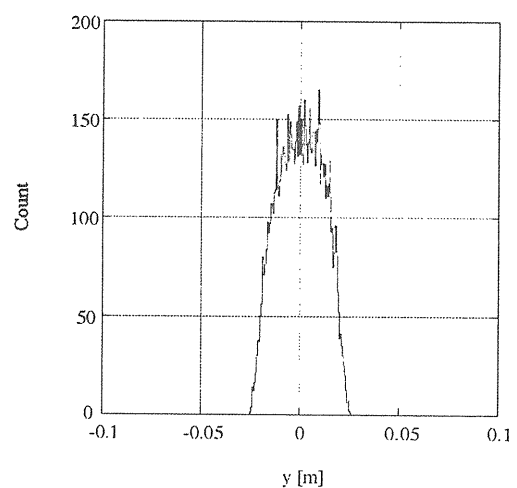
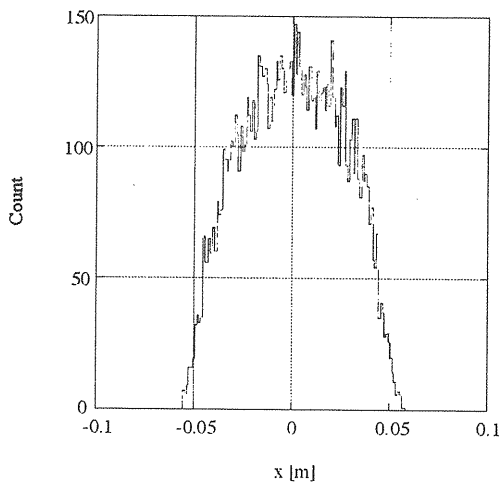
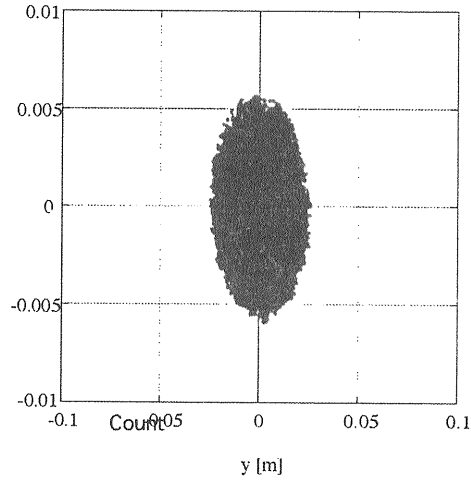
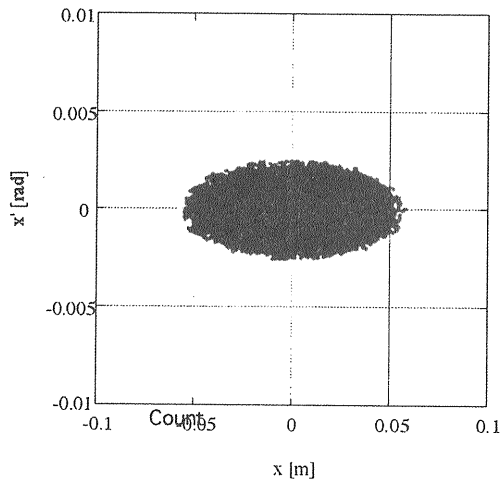
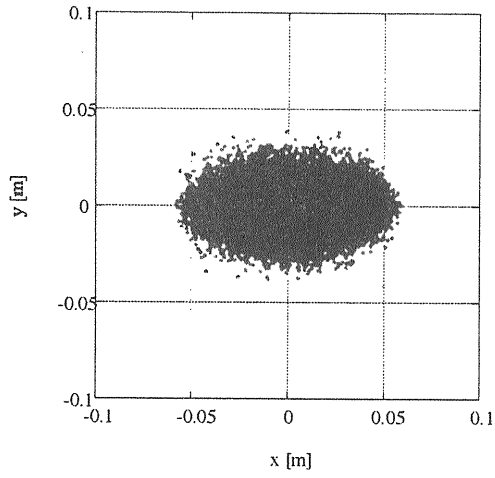


図 2.28 空間電荷効果を入れない場合のビーム分布 (anti-collimated painting)

anti-correlated paint - space-charge ON



```

! define machine
!
brho,   energy=0.020, tstepb=2.e-6, constant=0.9542578
rf,     harmonic=2, v1factor=1.e-6, constant=1.70e6
!hauce, aperture=0.090, laperture=1.5, ifile1=77, slow, ifile2=4
!atice, aperture=0.28, laperture=1.5, ifile1=77, slow, ifile2=4
!
! define beam
cleardistribution
macroparticle, numpart=10000, &
  ldistnb=laparab, distribu=kv, &
  dsig=0, dpsig=0.0, exin=1.e6, eyin=1.e6, &
  driftspace=0, sigmacut=3.0, xinjoff=0, &
  injectn=339, pintra, &
  iscedlon=9236487, iscedtra=4857679
injectn=1, chopper1=0.22, chopper2=0.22, &
testparticle, numpart=6, &
  smin=0, sunt=0, spin=0.0, spunt=0, &
  xmin=1.e-12, xunt=9.15e-6, &
  ymin=1.e-12, yunt=9.15e-6
!testparticle, numpart=30, smin=0, sunt=0, &
  sprin=2.0e-3, spunt=0.0e-3, xmin=450.00e6, xunt=15.0e6, &
  ymin=300.00e6, yunt=10.0e6
!spacecharge, current=5.0, gamma=-1.596, emitsn=0.010, &
spacecharge, current=0.05, nrg=40, nrg=50, nbg=16, mmode=4
monitor, nprofile=50, wprofile=0.200
! track beam
run,   timestep=0.1e9, tstepinj=0.1e9, &
  icon=fromzero, niturnmx=400, unformatted, &
  dumpmacro=100000, dumptest=1, dumpprofile=100000, &
  dumpfil=100000
stop

```

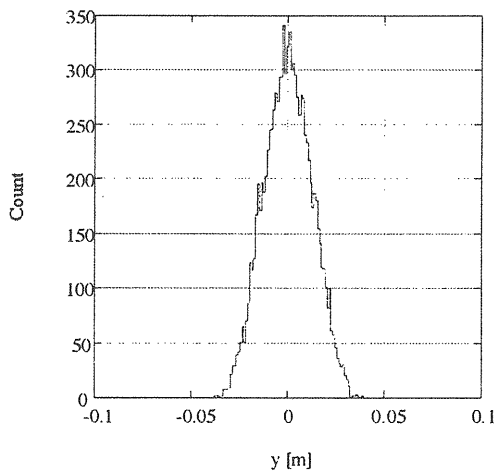
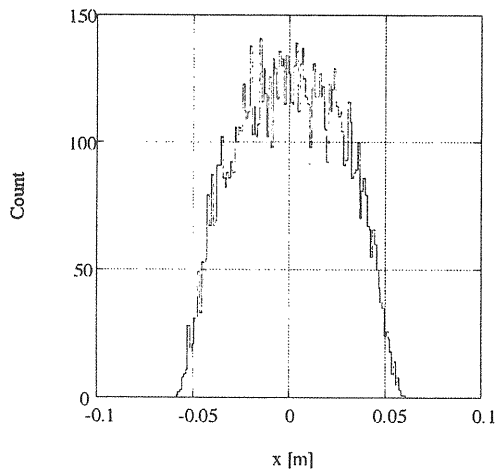
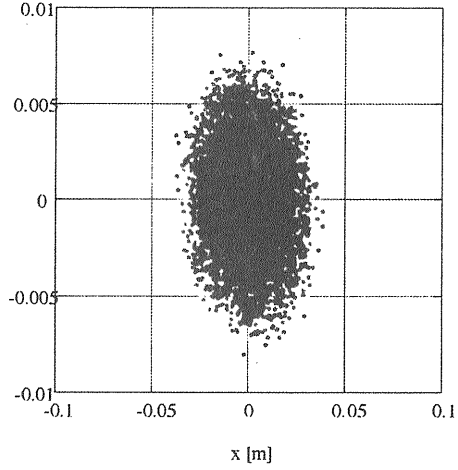
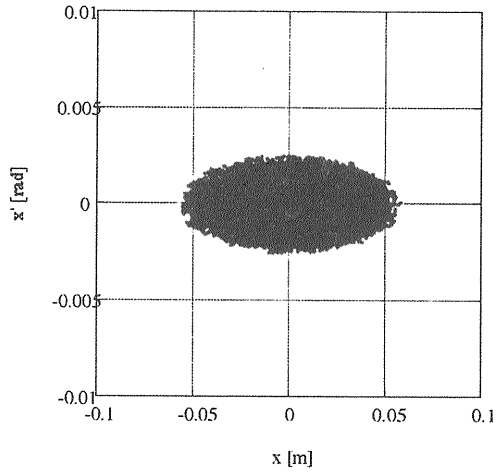


図 2.29 空間電荷効果を入れた場合のビーム分布 (anti-collimated painting)

2.3.3.3 correlated painting

correlated painting とは水平方向と垂直方向のペインティングの方向を同じにしたものである。すなわち水平方向、垂直方向ともにアクセプタンスの中心から外側に、もしくは外側から内側に向かってペインティングを行う。図 2.30 に correlated painting ペインティングの概念を示す。図に示すようにこの場合実空間粒子分布は長方形となる。

$$\text{水平方向} \quad 50 \left(1 - \sqrt{\frac{t}{T}} \right) + 55; \text{mm}$$

$$\text{垂直方向} \quad 5 \sqrt{1 - \frac{t}{T}}; \text{mrad}$$

144 π . mm. mrad のペインティングを行った場合は、

実空間では anti-correlated painting 時楕円ビームの外接長方形となる。図 2.31 に SIMPSONS で計算した結果を示す。

なお、計算結果についてはプレリナリなもので現在詳細な計算ならびに ACCSIM との比較検討等を行っている。

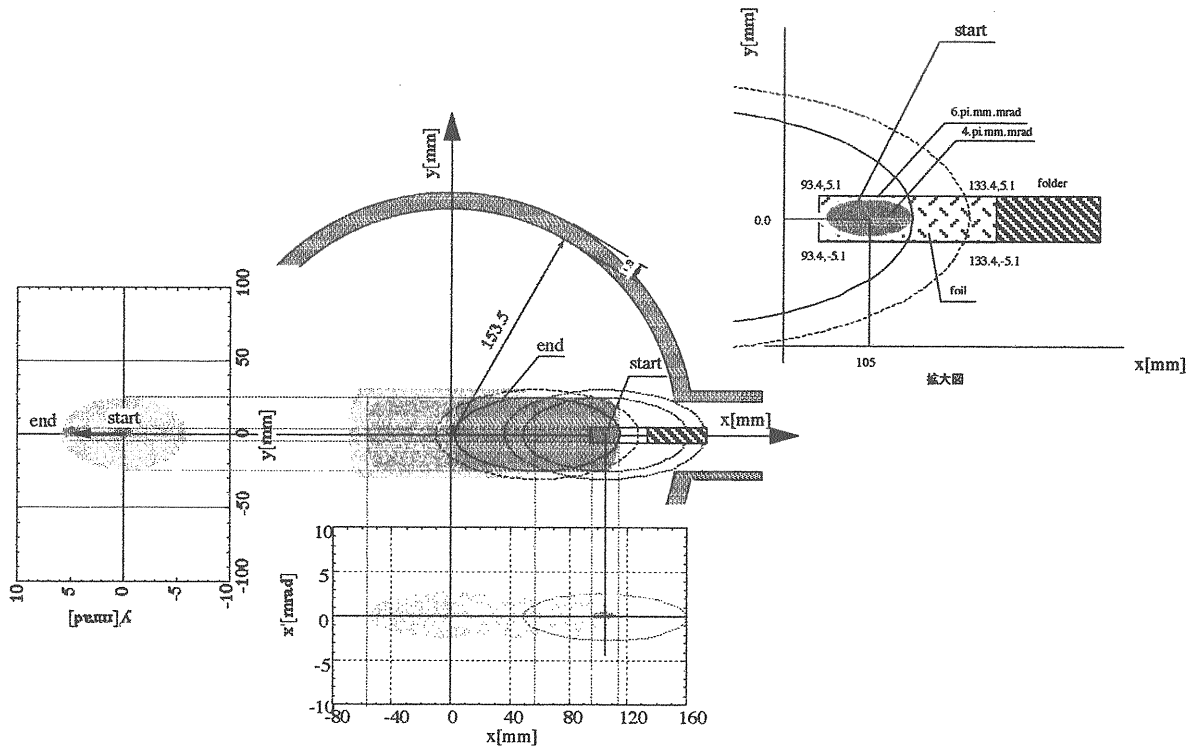


図 2.30 correlated painting

correlated paint - space-charge ON

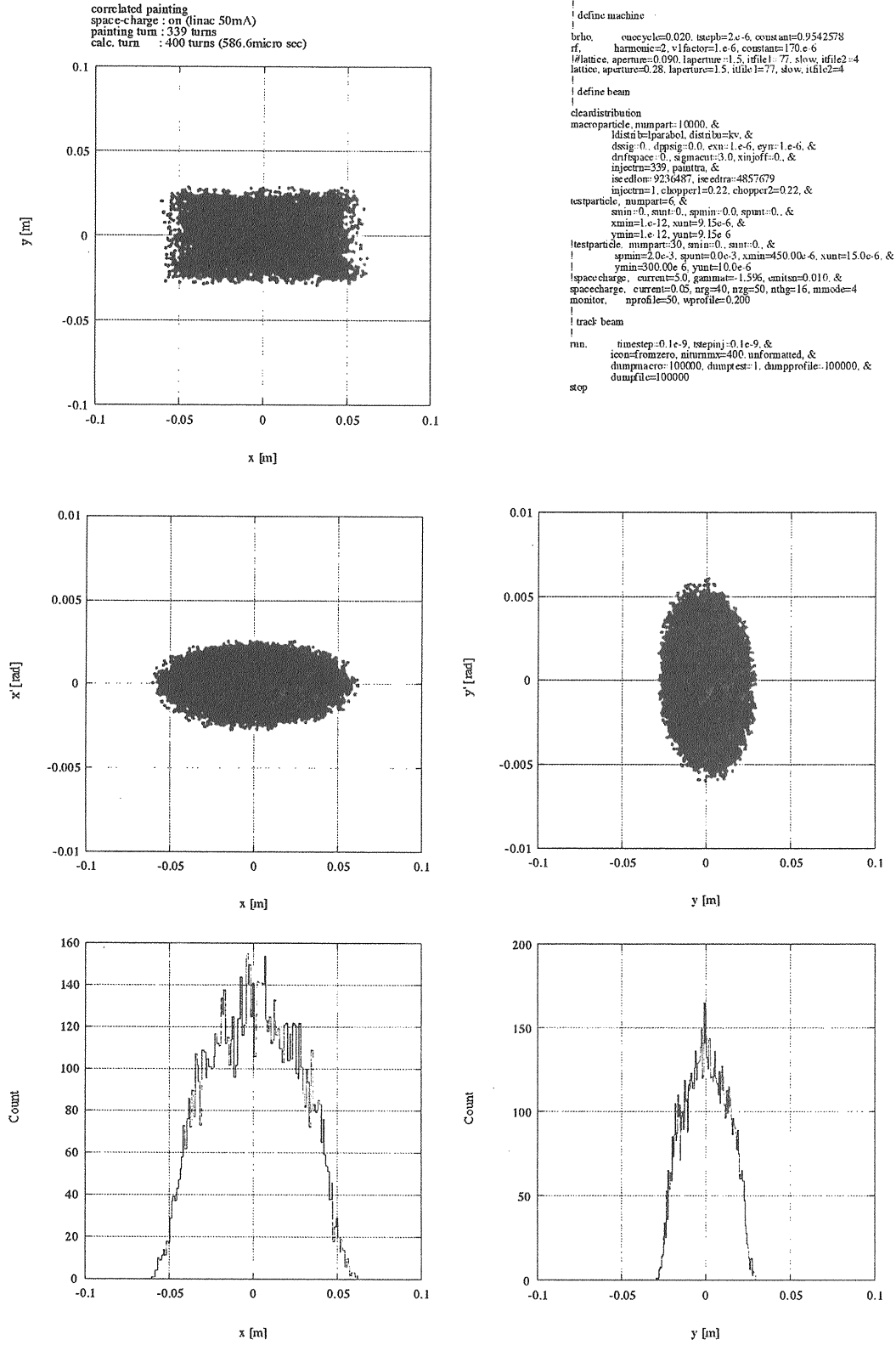


図 2.31 空間電荷効果を入れた場合のビーム分布 (collimated painting)

2.4 コリメータセクション

コリメータの詳細については別講義に任せるとして、ここではどのような思想の元にコリメータが設置される直線部を設計したかを説明する。

コリメーション自体は実空間において行う訳であるが、対象となるのは横方向位相空間と縦方向位相空間に分けられる。横方向位相空間とは水平方向 (x 、 x')、垂直方向 (y 、 y') で表記される空間である。一方縦方向位相空間とは (ϕ 、 $\Delta p/p$) で表される空間である。

まず横方向位相空間でコリメーションを行うには位相空間における位相の変化が重要となる。そのため長直線部においてできるだけ位相の進みが大きく、かつ各変化幅ごと (たとえば 30deg, 60deg 毎) にコレクターを配置できるようなラティスを選択した。図 2.32 に現ラティスの位相変化、図 2.33 にダブルットラティスの位相変化を示す。ダブルットの一般的な特徴としては横軸のスケールは異なるので注意していただきたい。チューンの取り方にもよるが、FODO ラティスの方が一様に位相が進み、ある位相幅毎にコレクターを入れるのに適していると思われる。一方ダブルットラティスの場合、ドリフト部分の位相変化が小さいため、コレクターを入れる箇所が限られる。このような理由で入射、出射でのデメリットがあるものの入射、出射の機器配置の目処が立ったため FODO を選択した。

図 2.34 に横方向エミッタンス、運動量分散のコリメーションできる範囲を示す。横方向コリメータの設置範囲をディスパージョンフリーとする事で、横方向エミッタンスは設定値 216π .mm.mrad で水平、垂直ともにコリメーションできる。しかし運動量分散に関しては β 関数をゼロにすることは不可能であるのでどうしても設定値 1% に対してテールを持ってしまう。3GeV シンクロトロンではこのテールの部分を少なくするため β/η をできるだけ小さくするようにラティスを組んでいる。

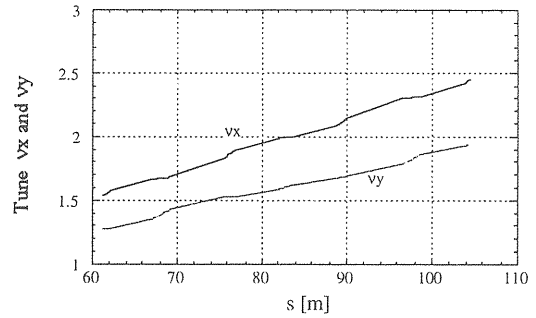


図 2.32 FODO の場合のチューン変化 (位相変化)

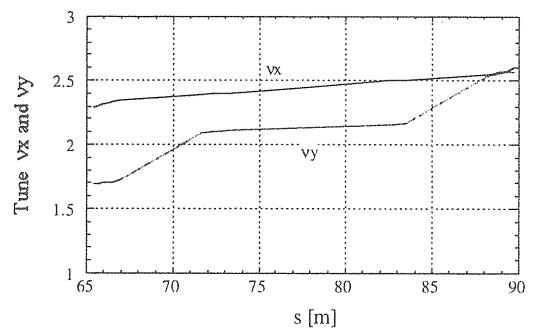


図 2.33 ダブルットの場合のチューン変化 (位相変化)

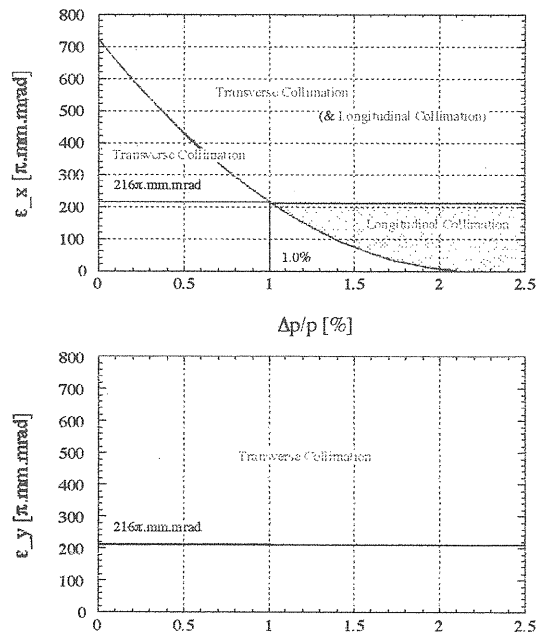


図 2.34 横方向、縦方向コリメータのコリメーション領域

2.5 出射セクション

2.5.1 概要

出射セクションにはキッカー電磁石とセプタム電磁石が配置される。出射時のビームエミッタンスは400MeVで 216π .mm.mradのビームがダンピングしたとして3GeVでは 54π .mm.mradとなる。しかしながらわずかなビームロスでも問題となるこの加速器ではこの 54π .mm.mradを取り出せればよいというものではない。現在の設計では出射ラインのアパーチャはコリメーションアパーチャ 216π .mm.mradを確保している。また通常セプタム部でのビームセパレーションを大きく取るためバンブ軌道と併用されることがあるが、現在の設計では併用していない。

2.5.2 出射ビーム条件

2.5.2.1 エミッタンスと運動量分散

入射時に 216π .mm.mradまで広がったビームは、加速に従い小さくなり、出射時の規格化エミッタンスは 54π .mm.mradとなる。これに対して、取り出しラインのアパーチャはコリメータのアパーチャと同じ 216π .mm.mradで設計を行っている。これはビームハロー等がコリメータアパーチャまで広がる可能性があるためである。(必ずしも 216π .mm.mrad以上のビームがないことが保証できるわけではない。なぜならばコリメータの設計を運動量分散が最大となる450MeV近傍のエネルギーに対して行っているためである)一方、運動量拡がりについても縦方向コリメータと同じ1.0%を確保している。

2.5.2.2 バンチ構造

バンチ間隔は3GeVユーザー向けと50GeV向けとで異なる。これは高周波システムの運転パターンによって切り替えられる。各ユーザー向けの出射ビームパラメータを表2.7、2.8にまとめる。また図2.35、36に出射パルスの構造を示す。出射ビームは50GeVシンクロトロン運転周期3.42sにあわせて4パルス分(8バンチ)を50GeVシンクロトロンに、残りを3GeVユーザに送る。

表 2.7 3GeV ユーザへの出射ビームパラメータ

3GeV
$\Delta p/p = \pm 1.0\%$ 以内 ($\pm 0.4\%$ 程度)
Bunching factor = 0.180+10% (0.198)
160ns-ON, 378.5ns-OFF
進行方向分布..... パラボリックビーム
運動量方向分布... ガウス分布

表 2.8 50GeV への出射ビームパラメータ

50GeV エミッタンスマッチングあり
$\Delta p/p = \pm 1.0\%$ 以内 ($\pm 0.8\%$ 程度)
Bunching factor = 0.315+10% (0.3465)
280ns-ON, 258.5ns-OFF
進行方向分布..... パラボリックビーム
運動量方向分布... ガウス分布

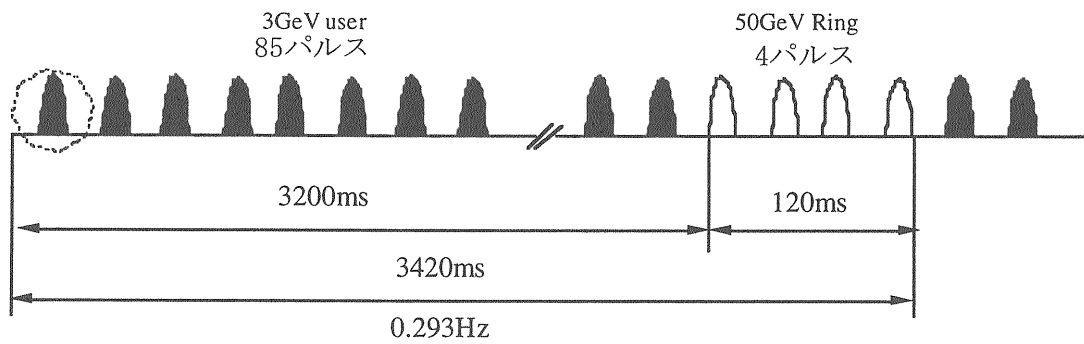


図 2.35 出射ビームのマクロ構造

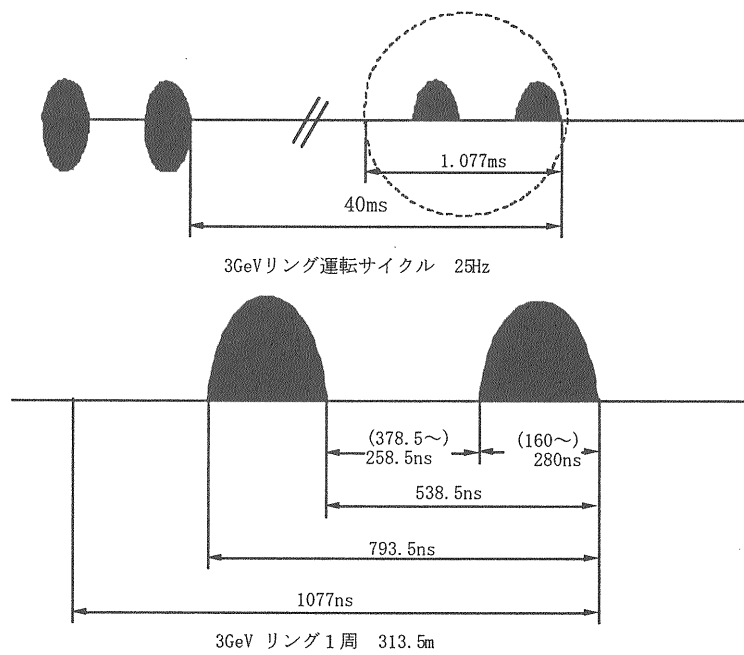


図 2.36 出射ビームのマイクロ構造

()内は 3GeV ユーザー向けビームの値

2.5.3 出射ラティス設計

図 2.37 に出射機器配置を示す。3GeV まで加速されたビームは 11 台のキッカー電磁石と 4 台のセプタム電磁石によって 1 ターン以内にリングから取り出される。キッカー電磁石の立ち上がり時間は図 2.36 からわかるように 250ns 以下である必要がある。

図 2.38 は各電磁石の出口端面でのビーム位置を示

したものである。セプタム上流側直近の QDS ではアパーチャぎりぎりまでビームがシフトしている。

またキッカー電磁石は 11 台のうち 1 台が励磁されない場合でも 54π .mm.mrad のビームはシンクロロン外に取り出せる設計としている。

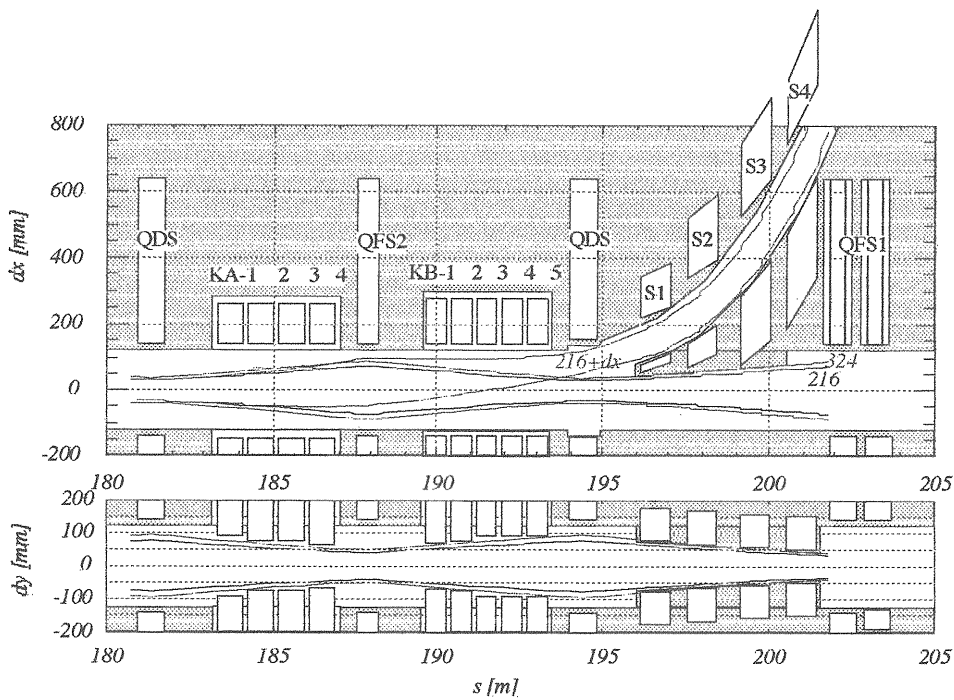


図 2.37 出射機器配置ならびに出射軌道

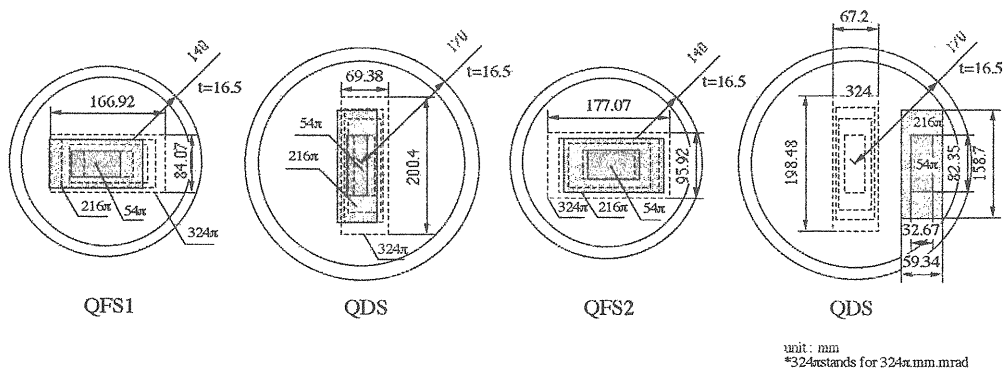


図 2.38 出射機器配置ならびに出射軌道

3. 50GeV シンクロトロン

3.1 50GeV シンクロトロンの概要

50GeV シンクロトロンでは 3GeV シンクロトロンからのビームを受け取り、さらに 50GeV まで追加速する。図 3.1 に 50GeV シンクロトロンの概略図を示す。形状は 3GeV シンクロトロンと同様三角形をしており、3 カ所の長直線部を有する。これらの直線部は

入射・アポルト、遅い取り出し、高周波空洞・速い取り出しに利用する。図 3.2 に運転周期と入射、加速、出射のタイミングを示す。3GeV シンクロトロンと大きく異なる点は、運転周期が 3.42s と長く、パターン電源で電磁石の励磁を行う点である。各フェーズの所要時間は表 3.1 に示すとおりである。

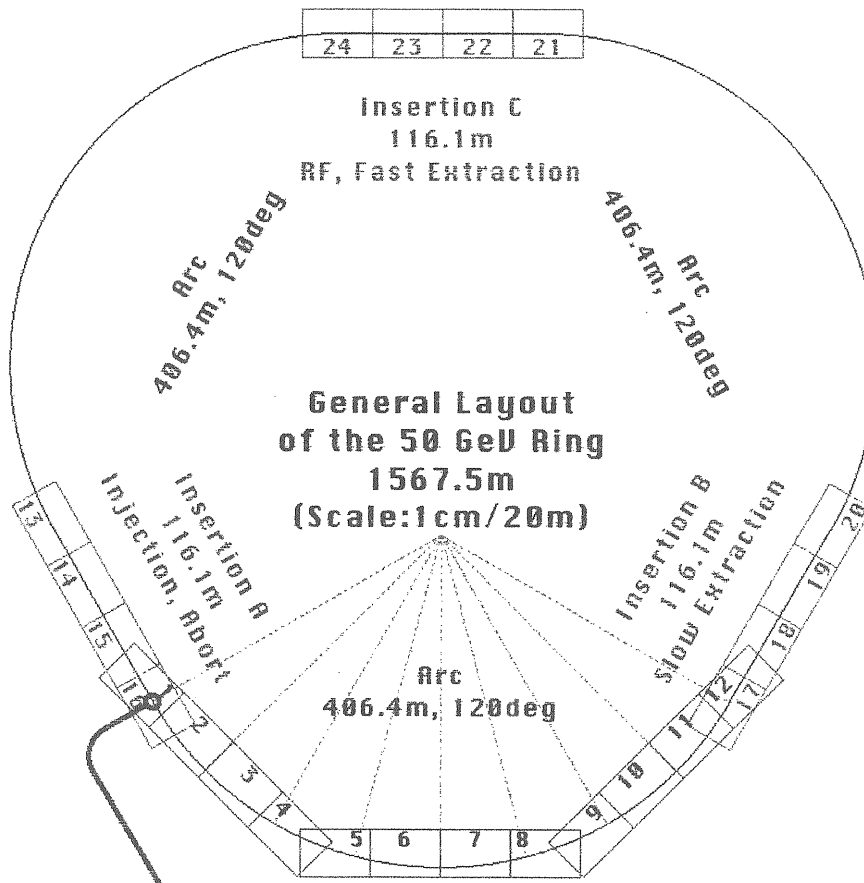


図 3.1 50GeV シンクロトロン概略図

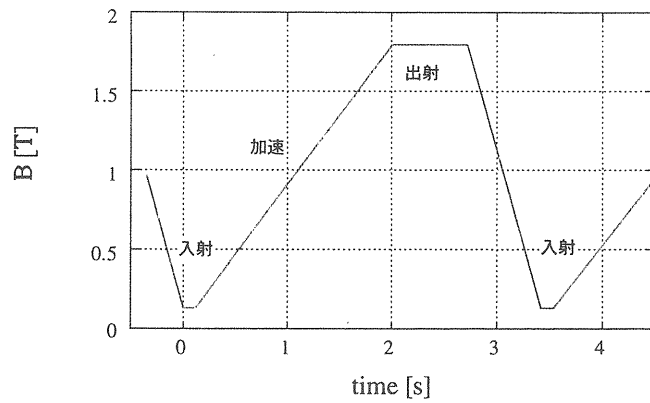


図 3.2 50GeV シンクロトロン加速サイクル

表 3.1 励磁パターン

フェーズ	時間 [s]
入射	0.12
加速	1.9
フラットトップ	0.7
減速	0.7

表 3.2 50GeV シンクロトロン主要パラメータ

Quantity	Value
Circumference	1567.5 m
Average radius	249.5m
Injection energy	3GeV
Extraction energy	30-50GeV
Repetition rate	0.293Hz
Beam power	1.0 MW
Number of protons	3.3×10^{14}
Tune(Horizontal/Vertical)	22.25/22.23
Transition Gamma	imaginary
Super-periods	3

3.2 ラティス

図 3.3 に 50GeV シンクロトロン の β 関数、 η 関数を示す。50GeV シンクロトロン の大きな特長はイマジナリガンマラティスを組んでいることにある。3GeV のところで簡単に述べたようにトランジションガンマの前後で縦方向の位相安定性の領域が反転する。周長とかにもよるが単純な FODO ラティスでシンクロトロンを作ると 50GeV ともなるとこのトランジションガンマをまたぐことになる。そのため、偏向電磁石の一部を抜いたミッシングバンド部でディスパージョンが大きくなるように、またそのほか

のバンドの部分 (一部) でマイナスになるようにディスパージョン関数にモデュレーションをかけている。これによりモーメントムコンパクションファクタは負の値となり、トランジションガンマは虚数となる。すなわち加速途中でのトランジションガンマ通過によるビームロス は避けることができる。空間電荷力によるインコヒーレントチューンシフトは入射時で $-0.062 / -0.166$ 、出射時で $-0.000 / -0.007$ である。またコヒーレントチューンシフトは入射時で $0.010 / -0.065$ 、出射時で $0.002 / -0.003$ と見込んでいる。

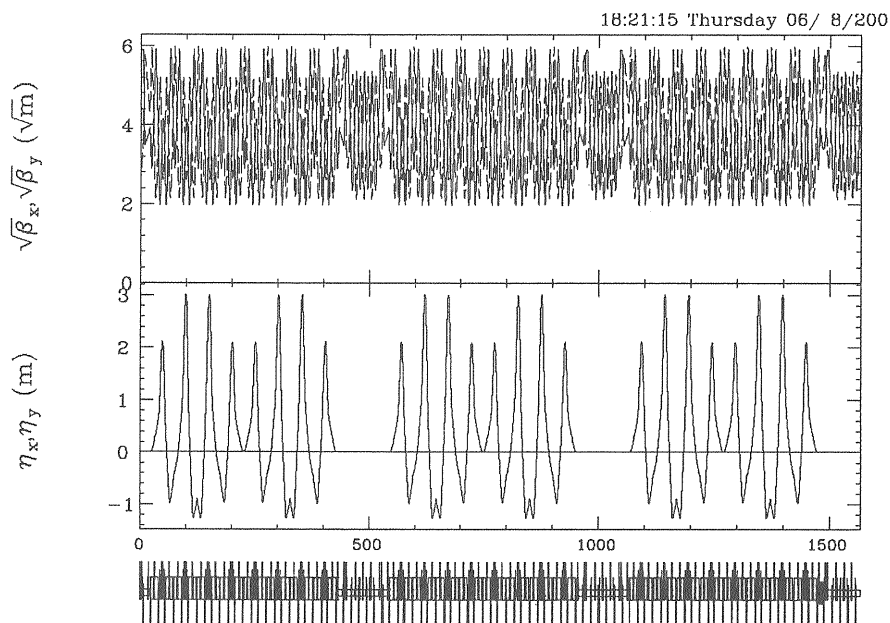


図 3.3 50geV シンクロトロン の β 、 η 関数

表 3.3 横方向エミッタンス

Transverse Emittance	
at Injection	54π . mm. mrad (normalized value 220π . mm. mrad)
at Extraction@30 GeV	10π . mm. mrad
at Extraction@50 GeV	6.1π . mm. mrad

表 3.4 縦方向エミッタンス

Longitudinal Emittance	
at Injection	10.75 eV.s , $\Delta p/p = \pm 0.67\%$
at Extraction@50 GeV	10.75 eV.s , $\Delta p/p = \pm 0.31\%$

3.3 入射

3.3.1 入射ビーム条件

50GeV シンクロトロンでは 3GeV シンクロトロンで 3GeV まで加速された H⁺ビームをバケット-バケット入射する。50GeV シンクロトロンでは 10 個の RF バケットがあり、40ms ごと (3GeV シンクロトロンの 25Hz 運転の 1 周期に相当する) に 2 バケット (バンチ) ずつ入射される。10 個の RF バケットのうち 2 個は速い取り出し用のキッカー電磁石の立ち上げのため入射は行わない。すなわち 3GeV シンクロトロンの 4 周期分 (8 バンチ分) 入射する。入射ビームのコア部分のエミッタンスは 54π .mm.mrad であるが、3GeV シンクロトロンのコリメーションシステムの制限で 216π .mm.mrad までビームが広がる危険性は残っている。そのため 3GeV シンクロトロンから 50GeV シンクロトロンへのビーム輸送系の途中にコリメーションシステムを配置し、 54π .mm.mrad 以上のビームはカットする。

3.4 出射

3.4.1 概要

50GeV シンクロトロンでは用途に合わせて速い取り出しと遅い取り出しの 2 通りの出射方式がある。速い取り出しで取り出した短パルスビームはニュートリノ実験に使用される。また遅い取り出しで取り出した長パルスビーム (~0.7s) は素粒子原子核実験に用いられる。出射エネルギーは 30GeV-50GeV となっている。

3.4.2 出射ビーム条件

30GeV-50GeV取り出し時の許容ビームロス、速い取り出しの場合で 0.15% (1.13kW)、遅い取り出しの場合で 1% (7.5kW) である。取り出し時のビームエミッタンスと出射軌道アクセプタンスは速い取り出し、遅い取り出しともに表**に示すとおりである。

表3.5 横方向エミッタンスと
出射軌道アクセプタンス

	横方向エミッタンス
30GeVエミッタンス	6.7
50GeVエミッタンス	4.1
出射軌道アクセプタンス	10π .mm.mrad以上

3.4.3 速い取り出し

キッカー電磁石 6 台、セプタム電磁石 5 台を使用してビームを 1 ターン以内で取り出す。図 3.4 に機器配置と出射ビーム軌道を示す。図 3.5、図 3.6 はセプタム直近上流側 2 つの 4 極電磁石部での周回ビームと出射ビームの位置を表す。キッカー電磁石に要求される仕様は立ち上がり $1\mu s$ 以下、フラットトップ $4\mu s$ 以上、一様性 1% である。

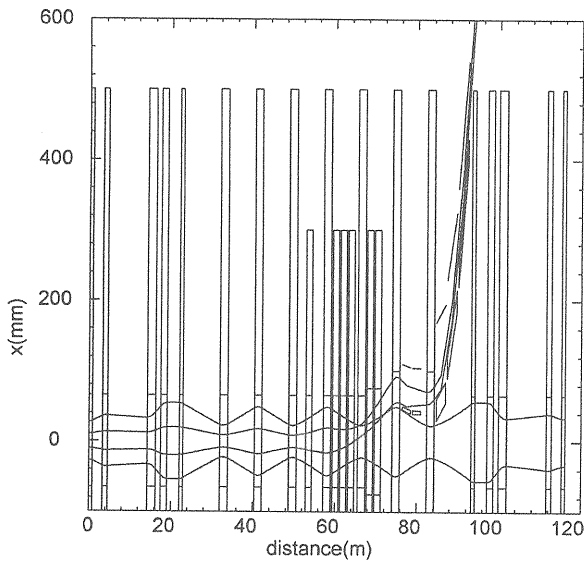


図 3.4 出射機器配置と出射軌道

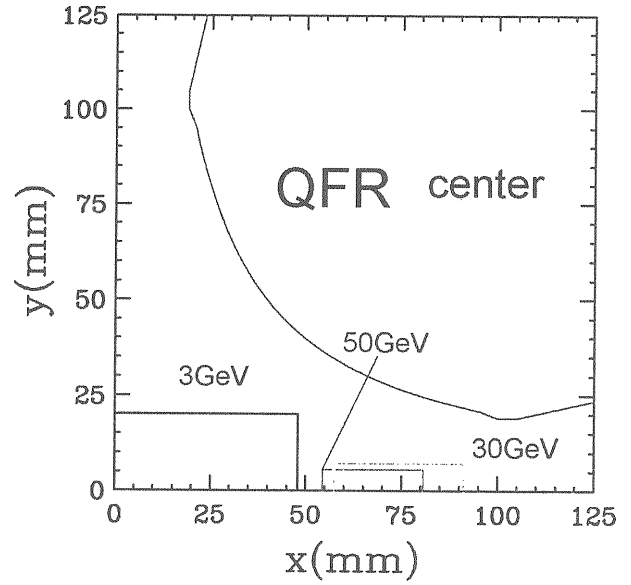


図 3.5 QFR 中心での出射ビーム位置

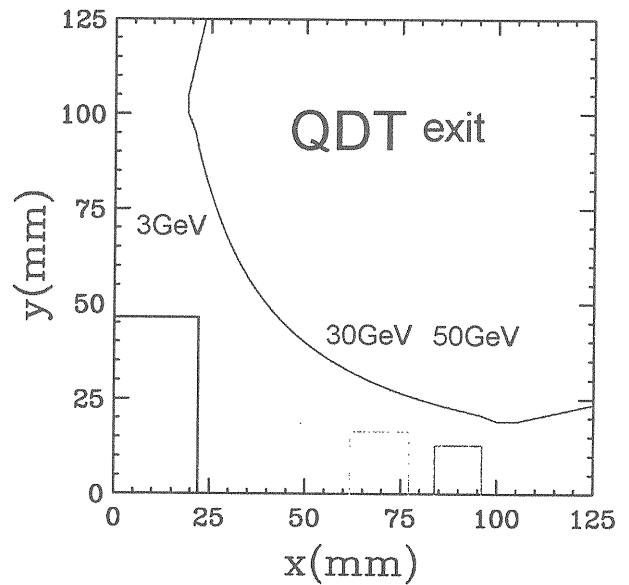


図 3.6 QDT 出口での出射ビーム位置

3.4.4 遅い取り出し

遅い取り出し方法としては現在2次共鳴を利用したものや3次共鳴を利用したものがよく利用される。

2次共鳴の場合、4極電磁石と8極電磁石を利用することで安定領域を変形させセパトリックスからこぼれた粒子をセプタムへと導く。この場合、腕は2本となり、腕が交差することもなく、比較的大きなターンセパレーションを得ることができる。またリング内にビームを取り残しにくいなどのメリットもあるが、4極電磁石のリップルの影響を受けやすい、調整が難しいなどの短所がある。この方法はKEK-PS、Fermi-MIなどで使用されている。一方、3次共鳴を利用した場合、6極電磁石を励磁しながら、3次共鳴にチューンを近づけていくことにより三角形のセパトリックスを形成する。概念図を図3.7に示す。このセパトリックス外にビームを持っていけばその粒子はターンごとに振幅を増し、セプタムに入ることになる。この取り出し方法はCERN-PS、AGSなどでも採用されている。

安定領域からビームをはずす方法としてはセパトリックスのサイズを徐々に小さくする方法とビーム自体をブローアップさせる方法がある。50GeVシンクロトロンではセパトリックスのサイズを変えることによって、ビームの外周部から安定領域の外にでることになる。安定領域からはずれた粒子はターンごとに振幅を増し、セプタムをクリアして出射軌道に入る。この場合、セパトリックスのサイズによって取り出されるビームの傾きが変わってしまうため、取り出しの枝が一致するようバンプ軌道を使用して調整を行っている。また多極成分(8極成分)によってはセパトリックスの腕が隣接し、所定のターンセパレーションが得られなかったり、出射角度が変わったりするので注意が必要である。一方でQのエラー磁場の影響が少なく、メカニズムが簡単、見通しがつけやすいため調整がしやすいというメリ

ットがある。

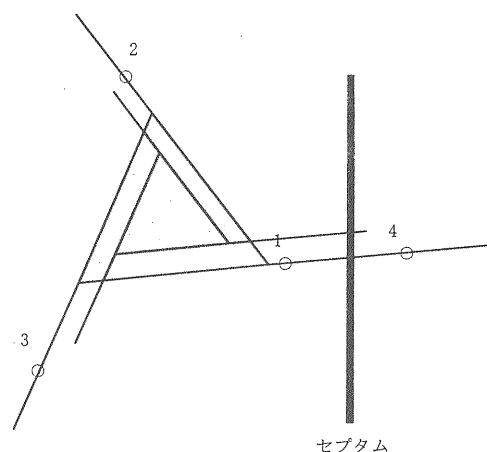


図3.7 3次共鳴を利用した遅い取り出しの概念

遅い取り出しでのビームロスの設定値は1%

(7.5kW@50GeV)を想定している。この大部分は静電セプタムでのロスであり、ビームロス極小化のデザインが重要となる。取り出し/繰り返し周期は0.7s/3.42sで、116m直線部でシンクロトロンの外側に取り出す。取り出し時には高周波空洞をOFFしてコースティングビームにした状態でバンプ励磁、6極電磁石励磁、チューン動作点の移動(3次共鳴に近づける、という一連の作業を行う。

図3.8にチューンダイアグラム上での動作チューンの調整方向を示す。水平方向のチューンを22.333に近づけ、6極電磁石を励磁することにより3次共鳴を起こさせる。図3.9、3.10は出射用バンプ軌道並びに出射軌道を示したものである。図3.11は静電セプタム入り口での水平方向位相空間分布を示すもので、実際に3次共鳴が起き、分布が三角形になっていることがわかる。また安定領域からはずしたビームの振幅がターンごとに大きくなり静電セプタムの領域にまで達していることがわかる。セプタムは0.1mmのワイヤーが25mm間隔で並べられている。このワイヤーに当たる確率はシミュレーションでは1.2%となっている。図3.12、13はセプタム電磁石

SM1-1, SM2-1 入り口での位相空間分布を表し、このあたりではセパレーションがかなりとれ、セプタムに当たる粒子はほとんどないことがわかる。

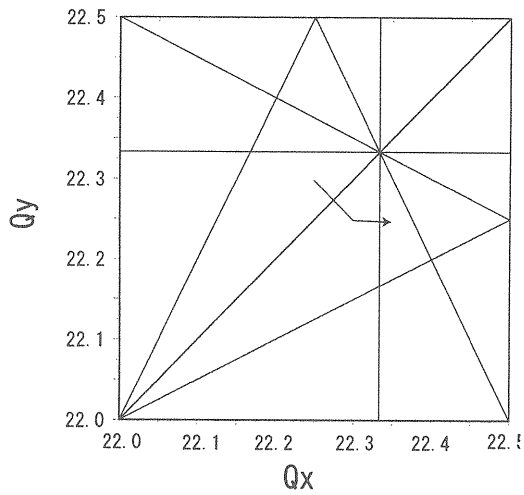


図 3.8 3次共鳴出射時のチューン調整

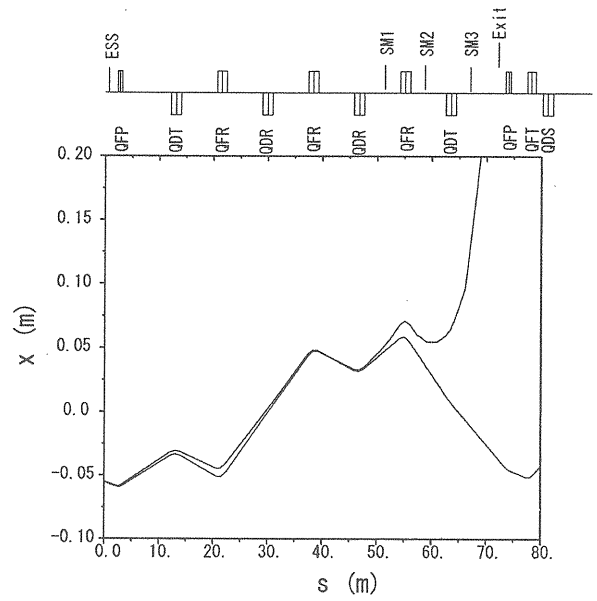


図 3.10 出射用バンプ軌道と出射軌道

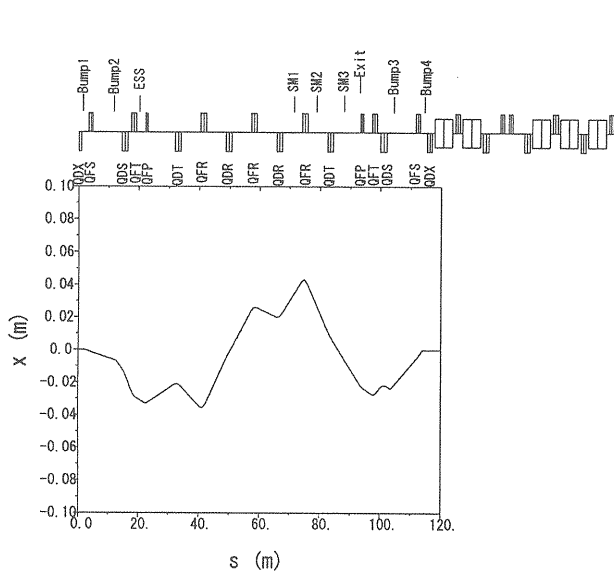


図 3.9 出射用バンプ軌道

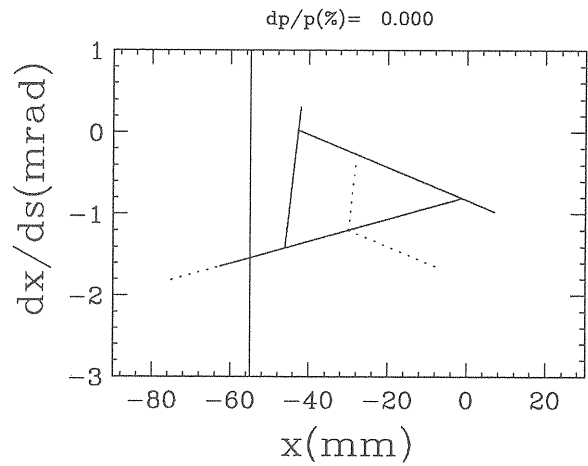


図 3.11 静電セプタム入り口での水平方向位相空間図

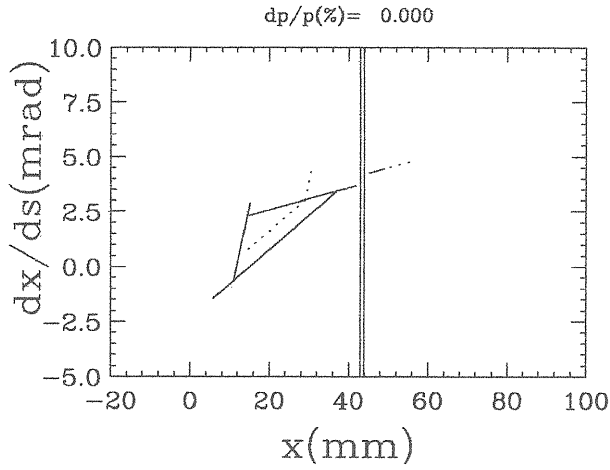


図 3.12 セプタム電磁石 SM-1-1 入り口での
水平方向位相空間図

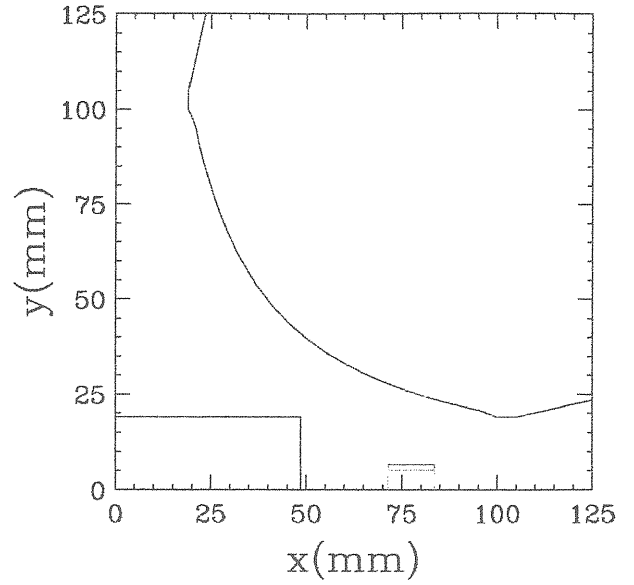


図 3.14 QFR 中心での出射ビームポジション

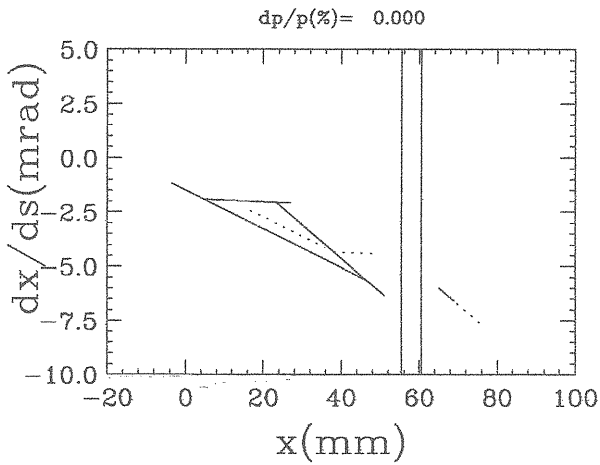


図 3.13 セプタム電磁石 SM-2-1 入り口での
水平方向位相空間図

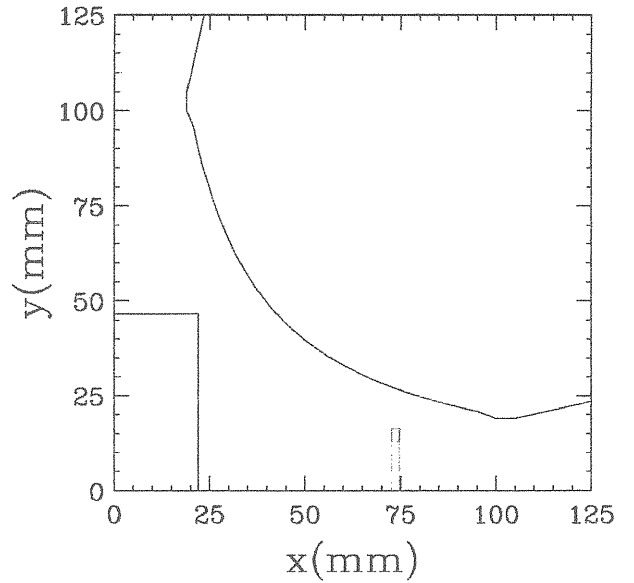


図 3.15 QDT 出口での出射ビームポジション